




## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/26005>

### To cite this version:

Noureddine, Farid  *Contribution à l'amélioration des performances des cellules robotisées dans l'industrie manufacturière.* (2019) [HDR]

Any correspondence concerning this service should be sent  
to the repository administrator: [tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée devant L'Institut National Polytechnique de  
Toulouse

par

Farid NOUREDDINE

Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de  
Rennes  
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de  
Tarbes

---

Contribution à l'amélioration des performances des cellules  
robotisées  
dans l'industrie manufacturière

---

Soutenue le 20 Décembre 2019 devant le jury :

Président : Professeur Cyril BRIAND

Rapporteurs : Professeur Philippe FRAISSE  
Professeur Youcef MEZOUAR  
Professeur Nouredine ZERHOUNI

Examineur : Professeur Jean DENAPE



# Remerciements & Dédicace

Je remercie sincèrement Monsieur Jean DENAPE, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant d'être mon correspondant auprès de l'Institut National Polytechnique de Toulouse pour le passage de cette HDR.

J'ai été très honoré que Messieurs Philippe FRAISSE, Youcef MEZOUAR et Noureddine ZERHOUNI, respectivement Professeur à l'Université de Montpellier 2, à l'Université Clermont Auvergne et à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques, acceptent de rapporter sur mon manuscrit. Leurs questions, remarques pertinentes et les échanges fructueux au cours de la soutenance me confortent dans la poursuite de mes travaux avec des éclairages nouveaux.

Mes chaleureux remerciements vont également à Monsieur Cyril BRIAND, Professeur à l'Université Toulouse 3, pour avoir accepté d'être membre de ce jury et d'en avoir assuré la présidence.

Je remercie aussi Monsieur Gabriel ABBA, Professeur à l'Université de Lorraine, d'avoir initialement accepté d'être rapporteur de cette HDR, même si des problèmes de santé ne lui ont malheureusement pas permis d'aller au bout de cette mission.

Je remercie Madame Cécile DE BARROS, personnel administratif au Laboratoire Génie de Production de l'ENIT pour son implication efficace et sa gentillesse dans toute l'organisation de la logistique de cette HDR.

Enfin, plus qu'un remerciement, je voudrais dédicacer ce travail à Annie, celle qui est à mes côtés depuis le tout début de ma carrière universitaire.



# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| Remerciements   | i         |
| Table des matières  | iii       |
| Introduction générale - Présentation du projet de recherche                                   | 1         |
| <b>1 Contrôle qualité des pièces dans l'industrie manufacturière - Application en usinage</b> | <b>3</b>  |
| 1.1 Introduction . . . . .  | 3         |
| 1.2 Maintenance systématique en usinage . . . . .   | 4         |
| 1.2.1 Modélisation de la rugosité . . . . .   | 4         |
| 1.2.2 Etude de cas - Usinage de finition en tournage . . . . .                                | 4         |
| 1.2.3 Mesure de la rugosité . . . . .   | 5         |
| 1.2.4 Prédiction de la rugosité par réseaux de neurones . . . . .                             | 6         |
| 1.2.5 Maintenance systématique - Usure systématique de l'outil de coupe . . . . .             | 6         |
| 1.2.5.1 Durée de vie de l'outil de coupe . . . . .  | 6         |
| 1.3 Statistiques d'ordre en contrôle qualité . . . . .  | 8         |
| 1.3.1 Statistiques d'ordre - Rappels théorique 1 . . . . .                                    | 8         |
| 1.3.2 Statistiques d'ordre extrême - Rappel théorique 2 . . . . .                             | 9         |
| 1.3.3 Résultats . . . . .   | 10        |
| 1.3.3.1 Estimation des paramètres de forme et d'échelle . . . . .                             | 10        |
| 1.3.3.2 Distribution des observations ordonnées . . . . .                                     | 11        |
| 1.3.3.3 Distribution de minima et maxima . . . . .  | 12        |
| 1.4 Conclusion . . . . .  | 13        |
| <b>2 Analyse de la fiabilité d'un outil de coupe</b>  | <b>15</b> |
| 2.1 Introduction . . . . .  | 15        |
| 2.2 Concepts de base de l'analyse de fiabilité - Rappel théorique . . . . .                   | 16        |
| 2.3 Modèle à risques proportionnels (proportional hazard model) . . . . .                     | 16        |
| 2.4 Evaluation de la fiabilité d'un outil de coupe . . . . .                                  | 17        |
| 2.5 Théorie des Valeurs Extrêmes et contrôle qualité . . . . .                                | 18        |
| 2.5.1 Problématique . . . . .   | 19        |
| 2.5.2 Comportement asymptotique du maximum - Rappel théorique . . . . .                       | 19        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.6      | Conclusion . . . . .  | 23        |
| <b>3</b> | <b>Tolérance aux fautes en robotique</b>                              | <b>25</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .  | 25        |
| 3.2      | Analyse du robot pour la surveillance . . . . .                       | 26        |
| 3.2.1    | Méthodes d'analyse . . . . .  | 27        |
| 3.2.1.1  | Décomposition du robot . . . . .                                      | 27        |
| 3.2.1.2  | Réalisation de l'AMDEC . . . . .                                      | 27        |
| 3.3      | Détection et isolation des fautes . . . . .                           | 28        |
| 3.3.1    | Cas général d'un système dynamique . . . . .                          | 28        |
| 3.3.1.1  | Génération de résidu structuré . . . . .                              | 29        |
| 3.3.1.2  | Dimensionnement de l'OEI et du résidu . . . . .                       | 29        |
| 3.3.1.3  | Equations fondamentales . . . . .                                     | 30        |
| 3.3.2    | Procédure . . . . .   | 33        |
| 3.3.2.1  | Choix des contraintes pour la DLF . . . . .                           | 33        |
| 3.3.2.2  | Etapes de conception de l'UIO . . . . .                               | 33        |
| 3.3.3    | Exemple . . . . .   | 34        |
| 3.3.3.1  | Résidu insensible à $f_{a_1}$ . . . . .                               | 35        |
| 3.3.3.2  | Résidu insensible à $f_{a_2}$ . . . . .                               | 35        |
| 3.3.3.3  | Résultats de simulation . . . . .                                     | 36        |
| 3.3.4    | Etude de cas . . . . .  | 37        |
| 3.3.4.1  | Modélisation dynamique du robot et représentation<br>d'état . . . . . | 38        |
| 3.3.4.2  | Modélisation des fautes . . . . .                                     | 39        |
| 3.3.4.3  | Exemple d'un étage de commande et détection . . . .                   | 40        |
| 3.4      | Accommodation des fautes . . . . .                                    | 42        |
| 3.4.1    | Robot anthropomorphe . . . . .  | 42        |
| 3.4.1.1  | Détermination de la zone de travail . . . . .                         | 43        |
| 3.4.1.2  | Mode sans faute . . . . .   | 44        |
| 3.4.1.3  | Mode avec fautes . . . . .  | 45        |
| 3.4.1.4  | Faute sur le bras 3 . . . . .   | 45        |
| 3.4.2    | Poignet et pince . . . . .  | 46        |
| 3.4.2.1  | Détection des fautes sur le poignet (axe 5) . . . . .                 | 47        |
| 3.4.2.2  | Injection des fautes . . . . .  | 48        |
| 3.4.2.3  | Pince tolérante aux fautes - Reconfiguration matérielle               | 48        |
| 3.5      | Conclusion . . . . .  | 49        |
| <b>4</b> | <b>Synthèse du projet de recherche</b>                                | <b>51</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 51        |
| 4.2      | Verrous scientifiques et retour d'expérience . . . . .                | 52        |
| 4.2.1    | La gestion du processus de parachèvement . . . . .                    | 52        |
| 4.2.2    | Aide à la génération automatique de trajectoire - Recalage . .        | 52        |
| 4.2.3    | Contrôle qualité des pièces usinées . . . . .                         | 53        |
| 4.3      | Plateforme IRP . . . . .  | 54        |

|                            |   |           |
|----------------------------|---|-----------|
| 4.4                        | Plateforme Métallicadour . . . . .                                      | 56        |
| <b>Conclusion générale</b> |   | <b>57</b> |
| <b>5</b>                   | <b>Rayonnement scientifique</b>   | <b>59</b> |
| 5.1                        | Publications . . . . .  | 59        |
| 5.1.1                      | Thèse . . . . .   | 59        |
| 5.1.2                      | Publications soumises en attente de décision (ACL) . . . . .            | 59        |
| 5.1.3                      | Publications parues . . . . .   | 59        |
| 5.1.3.1                    | (ACL) - 9 . . . . .   | 59        |
| 5.1.3.2                    | (ACLN) - 4 . . . . .  | 60        |
| 5.1.3.3                    | (ACTI) - 11 . . . . .   | 61        |
| 5.1.3.4                    | (ACTN) - 17 . . . . .   | 62        |
| 5.1.3.5                    | (COM) - 4 . . . . .   | 64        |
| 5.1.3.6                    | (OV) - 1 . . . . .  | 64        |
| 5.2                        | Encadrements . . . . .  | 64        |
| 5.2.1                      | Thèse de doctorat en cours - 2 . . . . .                                | 64        |
| 5.2.2                      | Thèses de doctorat soutenues - 4 . . . . .                              | 64        |
| 5.2.3                      | Thèse de magister soutenue - 1 . . . . .                                | 66        |
| 5.2.4                      | Master recherche et D. E. A. - 10 . . . . .                             | 67        |
| 5.3                        | Rayonnement scientifique et transfert industriel . . . . .              | 68        |
| 5.3.1                      | Participation aux jurys de thèses - 1 . . . . .                         | 68        |
| 5.3.2                      | Participation aux comités scientifiques et comités de lecture . . . . . | 68        |
| 5.3.3                      | Cluster - Groupement et Club . . . . .                                  | 69        |
| 5.3.4                      | Transfert industriel . . . . .  | 69        |
| <b>Bibliographie</b>       |   | <b>71</b> |





# Introduction générale - Présentation du projet de recherche

Différentes stratégies sont actuellement déployées dans l'industrie pour inciter les donneurs d'ordres à investir dans les technologies nouvelles pour rester ou redevenir compétitifs dans la compétition internationale. L'Usine du Futur, (ou usine 4.0 ), caractérise une vague devant affecter l'ensemble des entreprises, allant des grandes entreprises et Entreprises de Tailles Intermédiaires, jusqu'aux Petites et Moyennes Entreprises. La robotique, ou plus précisément, la cellule robotisée, est l'un des piliers sur lequel repose le concept Usine du Futur et, dans ce contexte, les performances de ces cellules robotisées ont encore un fort potentiel d'amélioration.

Dans l'absolu, le robot industriel est une machine très performante, à des prix devenus très compétitifs, pouvant atteindre, en général pour la mise en situation de l'organe terminal, des précisions de quelques centièmes à quelques dixièmes de millimètre, il est sûrement la pièce centrale de la cellule. Pour autant, les différents composants, notamment l'effecteur (outil, pince, torche à souder,...) liés au processus, sont des éléments qui interagissent directement avec le robot et qui font que les performances globales de la cellule doivent être considérées.

Pour accroître les performances d'une cellule robotisée et améliorer sa productivité, plusieurs pistes sont possibles, notamment en utilisant différentes options disponibles dans la commande du robot tel le guidage par contrôle de la force appliquée ou par des commandes incluant des systèmes de vision. L'utilisation des outils de CAO hors ligne peuvent aussi, dans certains cas, s'avérer très intéressants pour rendre plus efficiente la programmation des trajectoires du robot. Cette Programmation Hors Ligne, PHL, permet de compléter la programmation par apprentissage mais reste peu utilisée car la maîtrise totale de l'environnement doit être parfaite. L'exigence d'une bonne précision de la mise en situation de la pièce dans le référentiel robot est aussi essentielle.

Mon projet de recherche s'inscrit dans ce contexte de robotisation avec le double impératif d'agir d'une part sur l'amélioration du processus robotisé et d'autre part sur la surveillance de la bonne exécution de la tâche, tant dans son déroulement que dans son résultat. Dans le cas de l'usinage, et plus particulièrement dans le cas du parachèvement des pièces usinées, c'est-à-dire incluant le meulage, détourage, ébavurage et polissage, il sera opportun de s'intéresser au bon fonctionnement de la cellule robotisée, incluant le robot et aussi d'être vigilant aux considérations de

maintenance de l'outil, (fraise, meule, disque abrasif,...) ayant une implication directe sur la qualité des pièces produites. Dans le cas d'un usinage par exemple, l'état de l'outil est un paramètre qui subit une usure systématique qu'il convient de surveiller, surveillance que nous réalisons de façon indirecte puisque c'est la rugosité des surfaces usinées qui constituera l'indicateur de surveillance.

Ainsi, m'appuyant sur mon expérience et mes travaux antérieurs, le triplé Robot, Processus, Pièce est considéré, dans un contexte d'industrie manufacturière, avec une attention toute particulière portée à l'usinage et, à un degré moindre, à la manipulation. De ce fait, une contribution pourra être amenée quand il s'agit de travailler sur :

- la maintenance systématique de l'outil de coupe en usinage par une surveillance de la qualité des pièces produites, ainsi les chapitres 1 et 2 permettront d'amener certaines réponses face à un cas concret. L'application de méthodes statistiques est, dans ce cas, privilégiée ainsi que l'utilisation d'un modèle à risque proportionnel,
- la détection et localisation de fautes survenant sur le robot et les techniques possibles d'accommodation de ces fautes en introduisant un mode dégradé. Cet aspect sera développé au chapitre 3 et repose principalement sur des méthodes liées à l'automatique où une modélisation analytique du système est souvent nécessaire. Dans ce même chapitre sera décrite également une approche de surveillance d'une pince de robot dans le cas de la manipulation d'objet.

Le développement de ces 3 chapitres, couplé à la montée en puissance d'une cellule robotisée, IRP, (Industrial Robotics Platform) au LGP de l'Enit, permettra d'assembler certaines compétences et de proposer une synthèse sur les axes de recherche poursuivis, cette synthèse sera proposée au chapitre 4.

Enfin, le chapitre 5 clôturera ce mémoire en présentant mes publications, encadrements et globalement mon rayonnement scientifique.

# Chapitre 1

## Contrôle qualité des pièces dans l'industrie manufacturière - Application en usinage

### 1.1 Introduction

Le premier sous chapitre 1.2 traite de la maintenance systématique d'un outil de coupe dans le cas d'une maintenance systématique dans un processus d'usinage par surveillance de la rugosité des pièces usinées. Les ordres de maintenance sont généralement lancés à partir de valeurs prédéterminées de durée de fonctionnement, valeurs généralement obtenues à partir de valeurs statistiques moyennes. Toutes les déviations recensées, inhérentes à l'utilisation du système pendant une durée donnée, sont corrigées lors de l'opération de maintenance. Il est couramment admis, dans le cas de systèmes manufacturiers, que la maintenance préventive systématique s'avère performante pour corriger les fautes d'origine systématique, dont la principale est l'usure et notamment, dans le cas d'un usinage, de l'usure de l'outil de coupe qui entraîne une dégradation de la rugosité de la surface des pièces. Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Nouredine (2008), sous mon co-encadrement, et dans le cadre d'un accord de coopération scientifique entre l'Enit et l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran - Algérie. La thématique de cette thèse traitait de l'implémentation de la maintenance prédictive dans les systèmes de production. Toutes les références bibliographiques des articles de fond du domaine traité figurent dans cette thèse. Des travaux complémentaires récents, basés sur une approche réseaux de neurones, ont été menés dans Boukezzi *et al.* (2017a) pour prédire la rugosité en fonction des paramètres d'entrée que sont les conditions de coupe de l'outil.

Le second sous chapitre 1.3 traite de l'application des statistiques d'ordre pour l'étude de la fiabilité des systèmes où il est montré que la maintenance systématique d'un outil de coupe dans le cas d'usinage, pouvait être menée de par le contrôle de la qualité des pièces, par application des statistiques d'ordre sur un échantillon de pièces où la rugosité était mesurée. Ces travaux utilisent les données de Nouredine (2008) et sont les résultats de la thèse menée par Diamoutene (2018), soutenue fin

2018 à l'Enit sous mon co-encadrement. Un état de l'art exhaustif a été réalisé et est disponible dans cette thèse réalisée en cotutelle entre l'Université Fédérale de Toulouse et l'Université de Ouaga2 du Burkina Fasso.

## 1.2 Maintenance systématique en usinage

### 1.2.1 Modélisation de la rugosité

La rugosité des surfaces des pièces usinées dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions géométriques de l'outil de coupe associées aux conditions cinématiques du processus de génération qui se modélisent par un terme constant noté rugosité de génération  $R_g$ . D'autres facteurs sont associés à l'usure de l'outil et aux erreurs aléatoires d'usinage, modélisées par des fonctions déterministes ou aléatoires. Ces deux derniers facteurs s'additionnent généralement à  $R_g$ , comme il est montré dans nos travaux dans Nouredine *et al.* (2008).

La rugosité  $R_a(t)$ , définie comme l'écart moyen arithmétique du profil, peut s'exprimer, de façon déterministe, comme une combinaison linéaire de  $R_g$  et d'un terme  $ct^m$ , où les paramètres  $c$  et  $m$  dépendent des conditions de coupe utilisées lors de l'usinage :

$$R_a(t) = R_g + ct^m. \quad (1.2.1)$$

Les deux paramètres  $c$  et  $m$  sont généralement obtenus par des techniques d'identification.

Les erreurs aléatoires d'usinage se caractérisent par une dispersion importante sur les résultats expérimentaux des mesures de  $R_a(t)$ . Nous admettons que la dispersion des mesures présente une répartition suivant la loi normale. Cette répartition est centrée, de moyenne arithmétique nulle ( $\mu = 0$ ) et d'écart type  $\sigma$ . En posant  $s$ , la variable de répartition de la loi normale, l'équation (1.2.1) est alors bornée par un intervalle de confiance, c'est à dire :

$$R_g + ct^m - s\sigma \leq R_a(t) \leq R_g + ct^m + s\sigma. \quad (1.2.2)$$

### 1.2.2 Etude de cas - Usinage de finition en tournage

Le processus d'usinage porte sur un couple outil-matière composé d'un carbure métallique de nuance P20 pour ce qui est de l'outil, et d'un acier à traitement thermique de nuance C38, de diamètre 100 mm et de longueur 150 mm, pour ce qui est de la pièce. La rugosité maximale imposée par le dessin de définition est notée  $R_M = 4,8 \mu\text{m}$ . Afin de satisfaire à cette contrainte de rugosité, une étude préliminaire a été menée pour déterminer les conditions optimales de coupe (vitesse de coupe, avance et géométrie de l'outil).

### 1.2.3 Mesure de la rugosité

Les mesures ont été effectuées grâce à un rugosimètre électronique à palpeur inductif (Hommel Werke), avec une longueur de base de 2 mm et un cut-off de 0,75 mm. Ces mesures présentant une dispersion notable, il a été nécessaire de les réaliser sur un minimum de 5 séries de 10 pièces chacune. Les résultats des mesures sont présentés figure 1.2.1, où l'on note que la durée du tournage est approximativement 3000 s, soit 50 min. A l'issue de ce temps d'usinage, la rugosité des pièces  $R_a$  reste inférieure à la rugosité maximale autorisée  $R_M$ .

L'interprétation de ces courbes permet de décomposer  $R_a(t)$  suivant deux intervalles distincts :

- $0 < t \leq 540$  s :  $R_a(t)$  est approximativement constante, sa valeur correspond à  $R_g$ ,
- $t > 540$  s :  $R_a(t)$  suit une variation de type  $ct^m$ .

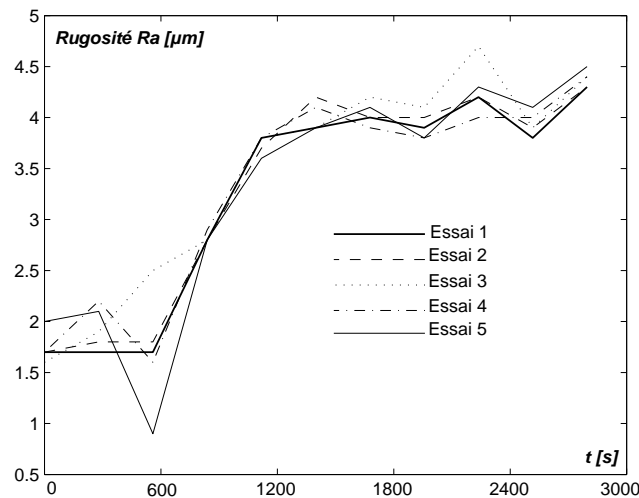


FIGURE 1.2.1: Evolution de la rugosité des 5 lots de pièces

L'ensemble des données relatives aux 5 courbes est traité par la technique classique des moindres carrés et permet d'identifier les valeurs des paramètres de l'équation 1.2.2, c'est à dire  $c$ ,  $m$ , ainsi que la valeur de  $\sigma$ . Ces paramètres sont donnés dans le tableau 1.2.3.

| $R_g$              | $c$ | $m$    | $\sigma$ |
|--------------------|-----|--------|----------|
| 1,79 $\mu\text{m}$ | 1   | 0,1017 | 0,27     |

Tableau 1.2.3 : Valeurs de  $R_g$ ,  $c$ ,  $m$  et  $\sigma$

### 1.2.4 Prédiction de la rugosité par réseaux de neurones

Les travaux menés par Boukezzi *et al.* (2017a), auxquels je participe, concernent la prédiction de la rugosité des pièces par utilisation des techniques de l'Intelligence Artificielle, et plus précisément par la construction d'un réseau de neurones. L'architecture du réseau multicouche construit comporte 3 neurones pour la couche d'entrée, correspondant aux 3 valeurs d'entrées du modèle : la vitesse de coupe  $V_c$  ( $[m.min^{-1}]$ ), l'avance de coupe  $a$  ( $[mm.tr^{-1}]$ ) et la profondeur de passe  $p$  ( $[mm]$ ), 1 neurone pour la couche de sortie correspondant à la rugosité  $R_a(t)$ . Le nombre de neurones de la couche cachée, après expérimentation, a été réglé à 10. La figure 1.2.2 présente la topologie du réseau.

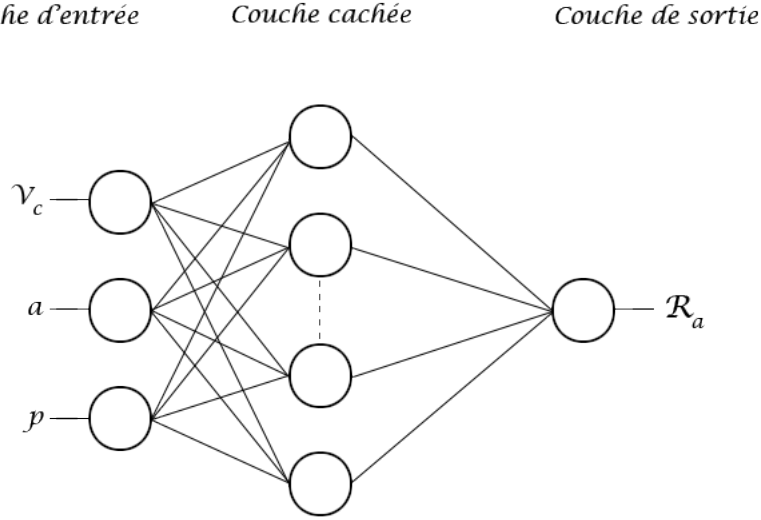


FIGURE 1.2.2: Topologie du réseau

Tous les résultats de prédiction de la rugosité en fonction des paramètres d'entrée sont regroupés dans Boukezzi *et al.* (2017b) et permettent donc une meilleure compréhension du processus étudié, en l'occurrence le tournage de finition.

### 1.2.5 Maintenance systématique - Usure systématique de l'outil de coupe

#### 1.2.5.1 Durée de vie de l'outil de coupe

L'usure normale de l'outil de coupe est généralement prise en charge par une maintenance systématique. Cette dernière repose sur la connaissance de la durée de vie de l'outil de coupe autorisant un temps de cycle d'usinage compatible avec la contrainte de rugosité imposée aux pièces. Cette détermination de la durée de vie de

l'outil de coupe peut être déduite d'abaques ou grâce à des logiciels, quand ceux-ci prennent en charge le couple outil-matière utilisé, ou déterminée de façon plus précise quand le modèle de durée de vie est établi.

D'après les résultats expérimentaux, montrés en figure 1.2.1, on peut considérer que la rugosité dans le premier intervalle est constante et procéder à un changement de base ( $toR$  à  $t'o'R'$ ) où l'on définit les temps  $t_f$ ,  $t_g$  et  $t_c$  comme indiqués sur la figure 1.2.3.

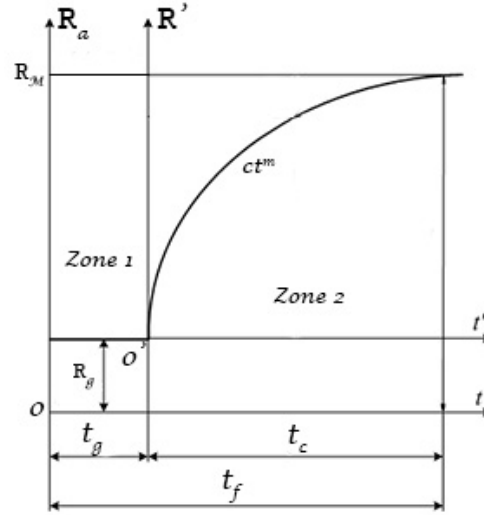


FIGURE 1.2.3: Changement de base

Des relations (1.2.1) et (1.2.2), on peut écrire :

$$R_g + ct_c^m + s\sigma \leq R_M. \quad (1.2.3)$$

La variable de répartition de la loi normale a pour valeur  $s = 3$  pour un intervalle de confiance à 99,7%, d'où :

$$t_c = \left( \frac{R_M - R_g - s\sigma}{c} \right)^{1/m}, \quad (1.2.4)$$

qui représente le temps du cycle d'usinage relatif au second intervalle, auquel il faut additionner  $t_g$  pour obtenir  $t_c$ , temps maximum du cycle d'usinage satisfaisant à la contrainte de rugosité :

$$t_f = t_g + t_c. \quad (1.2.5)$$

Nous déduisons directement de la figure 1.2.1  $t_g \approx 540$  s. Les équations (1.2.4) et (1.2.5) associées aux valeurs du tableau 1.2.3 permettent de déterminer  $t_f \approx 2815$  s, soit :



$$t_f \approx 47 \text{ min.} \quad (1.2.6)$$

La maintenance systématique de l'outil consistera donc, à  $t_f \approx 47 \text{ min}$ , en un changement de cet outil ou en son réaffutage.

Dans ce sous chapitre 1.2, nous nous sommes focalisés sur la durée de vie de l'outil en s'appuyant sur le modèle de rugosité des pièces usinées pour éviter les pièces hors tolérance et en considérant comme élément de cahier des charges une rugosité maximale  $R_M = 4,8 \mu\text{m}$ . Il nous a semblé intéressant de prévoir quel serait l'impact sur le nombre de pièces hors tolérance si la valeur maximale de rugosité était abaissée de  $4,8 \mu\text{m}$  à  $4 \mu\text{m}$ . Sur la base de cette nouvelle donnée, nous présentons dans le sous chapitre suivant 1.3 une approche s'appuyant sur les statistiques d'ordre qui permet de prédire le nombre maximal de pièces défectueuses.

### 1.3 Statistiques d'ordre en contrôle qualité

La statistique d'ordre est une branche de la statistique qui permet d'étudier le comportement de phénomènes préalablement ordonnés. De nombreuses références bibliographiques sont présentes dans la thèse de Diamoutene (2018). S'intéresser à la qualité des pièces implique de mettre en corrélation des mesures avec une décision liée à la qualité. La statistique d'ordre permet de répondre à ce problème, comme développé dans ce qui suit et qui se retrouve pour l'essentiel dans un travail publié en 2018 dans Diamoutene *et al.* (2018b). Pour faciliter la lecture des résultats présentés en 1.3.3, deux brefs rappels théoriques sont présentés en suivant.

#### 1.3.1 Statistiques d'ordre - Rappels théorique 1

Soit  $X_1, \dots, X_m$  un échantillon aléatoire de taille  $m$ , de fonction de densité commune  $f_X(x)$  et de répartition commune  $F_X(x)$ . Rangeons  $X_1, \dots, X_m$  dans l'ordre croissant de magnitude et soit  $X_{1:m} < X_{2:m}, \dots, < X_{m:m}$  les valeurs ordonnées. La première, la deuxième, ..., la  $m$ -ème statistique d'ordre notées respectivement par  $X_{1:m}, X_{2:m}, \dots, X_{m:m}$  sont définies par :

$$\begin{aligned} X_{1:m} &= \min \{X_1, \dots, X_m\}, \\ X_{2:m} &= \text{deuxième plus petite } X_i, \\ &\vdots \\ X_{m:m} &= \max \{X_1, \dots, X_m\}. \end{aligned}$$

Les fonctions de probabilité d'une statistique d'ordre quelconque reposent sur le théorème suivant, Castillo *et al.* (2005) :

**Théorème 1.3.1** *Supposons que  $X_1, \dots, X_m$  sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, iid, de fonction de répartition commune  $F_X(x)$*

et de fonction de densité commune  $f_X(x)$ . Alors la fonction de répartition de la  $r$ -ième statistique d'ordre  $X_{r:m}$  définie par  $X_{1:m} < X_{2:m}, \dots, X_{r:m}, \dots < X_{m:m}$  est notée  $F_{X_{r:m}}(x)$ , avec  $1 \leq r \leq m$  et la fonction de densité associée est notée par  $f_{X_{r:m}}$ . Ces deux fonctions sont données par :

$$\begin{cases} f_{X_{r:m}}(x) &= \frac{m!}{(r-1)!(m-r)!} (F_X(x))^{r-1} [1 - F_X(x)]^{m-r} f(x) \\ F_{X_{r:m}}(x) &= \sum_{j=r}^m C_m^j [F_X(x)]^j [1 - F_X(x)]^{m-j} \end{cases} \quad (1.3.1)$$

La fonction de fiabilité  $R$  est définie de telle façon que :  $R_{X_{r:m}}(x) = 1 - F_{X_{r:m}}(x)$ , ainsi nous obtenons :

$$R_{X_{r:m}}(x) = \sum_{j=1}^{r-1} C_m^j [F_X(x)]^j [1 - F(x)]^{m-j}.$$

### 1.3.2 Statistiques d'ordre extrême - Rappel théorique 2

Les statistiques d'ordre sont très importantes en pratique et particulièrement les statistiques d'ordre du maximum et du minimum, respectivement notées,  $X_{m:m}$  et  $X_{1:m}$ . Elles sont appelées statistiques d'ordre extrême.

La fonction de répartition  $F_{X_{m:m}}(x)$  de la statistique d'ordre du maximum  $X_{m:m}$ , est telle que pour toute réalisation  $x$ ,

$$\begin{aligned} F_{X_{m:m}}(x) &= P(X_{m:m} \leq x), \\ &= P(\max(X_1, \dots, X_m) \leq x) \\ &= P[\cap(X_i \leq x)], \\ \text{ainsi } F_{X_{m:m}}(x) &= \prod_{i=1}^m P(X_i \leq x), \\ &= \prod_{i=1}^m F_X(x), \\ \text{soit } F_{X_{m:m}}(x) &= [F_X(x)]^m. \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

Ainsi, on obtient la fonction de densité correspondante,  $f_{X_{m:m}}(x)$ , en dérivant la relation (1.3.2) et on obtient au final :

$$\begin{cases} f_{X_{m:m}}(x) &= m f_X(x) [F_X(x)]^{m-1} \\ F_{X_{m:m}}(x) &= [F_X(x)]^m \end{cases} \quad (1.3.3)$$

La fonction de répartition de la statistique d'ordre du minimum,  $X_{1:m}$  est obtenue de manière similaire comme suit :

$$\begin{aligned}
 F_{X_{1:m}}(x) &= P(X_{1:m} \leq x), \\
 &= P(\min(X_1, \dots, X_m) \leq x) \\
 &= 1 - P(\min(X_1, \dots, X_m) > x) \\
 &= 1 - P[\cap_{i=1}^m (X_i > x)], \\
 \text{ainsi } F_{X_{1:m}}(x) &= 1 - \prod_{i=1}^m P(X_i > x) \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^m (1 - F_X(x)), \\
 \text{soit } F_{X_{1:m}}(x) &= 1 - [1 - F_X(x)]^m. \tag{1.3.4}
 \end{aligned}$$

De même, la fonction de densité correspondante,  $f_{X_{1:m}}(x)$  est obtenue en dérivant la relation (1.3.4) et l'on obtient donc :

$$\begin{cases} f_{X_{1:m}}(x) &= m f_X(x) [1 - F_X(x)]^{m-1} \\ F_{X_{1:m}}(x) &= 1 - [1 - F_X(x)]^m \end{cases}. \tag{1.3.5}$$

### 1.3.3 Résultats

En traitant les résultats des données des 5 lots de pièces usinées et présentées au sous chapitre 1.2.2, nous proposons de retenir comme support pour la loi généralement considérée dans ce type d'application la loi de Weibull à 2 paramètres  $k$  et  $\lambda$  qui sont respectivement le paramètre de forme et le paramètre d'échelle :

$$\begin{cases} f_{k,\lambda}(x) &= \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \\ F_{k,\lambda}(x) &= 1 - \exp^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \end{cases}, \tag{1.3.6}$$

où  $f$  et  $F$  sont respectivement les fonctions de densité et de répartition.

#### 1.3.3.1 Estimation des paramètres de forme et d'échelle

Pour l'estimation des 2 paramètres  $k$  et  $\lambda$ , on utilise la méthode des moments rappelée dans Diamoutene (2018), qui nécessite au préalable d'établir la valeur moyenne, l'écart-type estimé et le coefficient de variation pour chaque lot. Le tableau (1.3.1) présente les valeurs obtenues pour chacun des 5 lots.

Pour le premier lot et en utilisant la relation (1.3.6) et le tableau (1.3.1), on obtient les expressions suivantes :

$$\begin{cases} f_{3.769,3.526}(x) &= \frac{3.769}{3.526} \left(\frac{x}{3.526}\right)^{2.769} e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}} \\ F_{3.769,3.526}(x) &= 1 - e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}} \end{cases}.$$

| Lots $N^0$                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Moyenne $\bar{x}$             | 3,138 | 3,079 | 3,151 | 3,110 | 3,110 |
| Ecart-type estimé $\sigma$    | 0,925 | 0,923 | 0,938 | 0,905 | 0,898 |
| Coefficient de variation      | 0,295 | 0,300 | 0,298 | 0,291 | 0,289 |
| Paramètre de forme $k$        | 3,769 | 3,700 | 3,728 | 3,826 | 3,855 |
| Paramètre d'échelle $\lambda$ | 3,526 | 3,499 | 3,540 | 3,494 | 3,494 |

TABLE 1.3.1: Paramètres de Weibull pour les 5 lots

La figure (1.3.1) donne les allures des fonctions de densité et de répartition pour chacun des 5 lots.

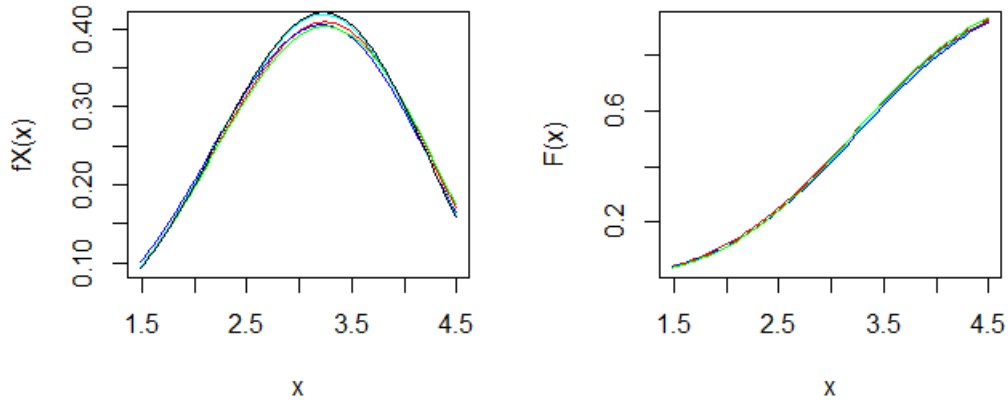


FIGURE 1.3.1: Fonction de densité à gauche et de répartition à droite de Weibull pour les rugosités de surface des pièces usinées

### 1.3.3.2 Distribution des observations ordonnées

Les dix observations ont été ordonnées pour chaque lot. En prenant le premier lot comme exemple, on détermine les fonctions de densité et de répartition pour la  $r$ -ième statistique d'ordre de l'échantillon de taille 10 en utilisant les résultats du tableau 1.3.1 et le système (1.3.1) :

$$\begin{cases} f_{X_{r:10}}(x) &= \frac{10!}{(r-1)!(10-r)!} \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}}\right)^{j-1} \cdot \left(e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}}\right)^{10-j} \\ &\quad \times \left(\frac{3.769}{3.526}\right) \left(\frac{x}{3.526}\right)^{2.769} e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}} \\ F_{X_{r:10}}(x) &= \sum_{j=r}^{10} C_{10}^j \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}}\right)^j \cdot \left(e^{-\left(\frac{x}{3.526}\right)^{3.769}}\right)^{10-j} \end{cases}.$$

De manière analogue, on peut obtenir pour les 4 derniers lots de mesure les fonctions de densité et de répartition pour la  $r$ -ième statistique d'ordre.

Comme déjà indiqué, nous prenons dans ce sous chapitre 1.3 une condition plus sévère pour la rugosité que celle donnée dans le sous-chapitre 1.2, à savoir une valeur maximale de rugosité  $R_M = 4 \mu\text{m}$ .

La probabilité d'avoir la dixième mesure inférieure ou égale à  $4 \mu\text{m}$  est  $F_{X_{10:10}}(4)$  et la fiabilité correspondante associée à l'outil de coupe est  $R_{X_{10:10}}(4)$ . Cette fiabilité, présentée dans le tableau (1.3.2), indique qu'il y a entre 11 et 13% de chance d'avoir au moins une mauvaise pièce.

| Lots $N^0$         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| $F_{X_{10:10}}(4)$ | 0,87 | 0,86 | 0,86 | 0,88 | 0,89 |
| $R_{X_{10:10}}(4)$ | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,12 | 0,11 |

TABLE 1.3.2: Probabilité d'avoir la dixième mesure inférieure ou égale à  $4 \mu\text{m}$  et fiabilité correspondante associée à l'outil de coupe

Considérons le cas de  $F_{X_{9:10}}(4)$  qui indique la probabilité d'avoir au moins huit bonnes pièces. Le tableau 1.3.3 montre que  $F_{X_{9:10}}(4) \simeq 1$ . Ceci signifie qu'il est quasiment certain d'avoir au moins huit bonnes pièces par lot. La fiabilité correspondante associée à l'outil de coupe est  $R_{X_{9:10}}(4)$ ; elle indique qu'il y a 1% de chance d'avoir plus de deux pièces défectueuses dans chaque lot. En outre, la magnitude de la mesure ( $x = 4 \mu\text{m}$ ) est assez indicative dans le comportement de l'outil de coupe sur la rugosité de surface des pièces usinées.

| Lots $N^0$        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| $F_{X_{9:10}}(4)$ | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| $R_{X_{9:10}}(4)$ | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

TABLE 1.3.3: Probabilité d'obtention d'au moins huit mesures inférieures ou égales à  $4 \mu\text{m}$  et fiabilité correspondante associée à l'outil de coupe

### 1.3.3.3 Distribution de minima et maxima

Dans cette modélisation, la distribution de la première statistique d'ordre est celle du minimum et correspond donc à la meilleure qualité obtenue pour les pièces. La fonction de densité du minimum est obtenue à partir de la relation 1.3.5 en posant  $r = 1$ ; par exemple pour le premier lot, on a :

$$f_{X_{1:10}}(x) = 10 \cdot f_{3.769, 3.526}(x) \cdot [1 - F_{3.769, 3.526}(x)]^9.$$

La fonction de densité  $f_{X_{1:10}}(x)$  pour les cinq lots, notée  $f_X(x)_{\text{mini}}$ , est donnée sur la figure (1.3.2). Les 5 courbes dans les différentes couleurs représentent la distribution du minimum pour chaque lot. On confirme sur cette figure que les valeurs élevées de  $f_{X_{1:10}}(x)$  sont obtenues pour les valeurs de rugosité de surface inférieures à  $2 \mu\text{m}$ .

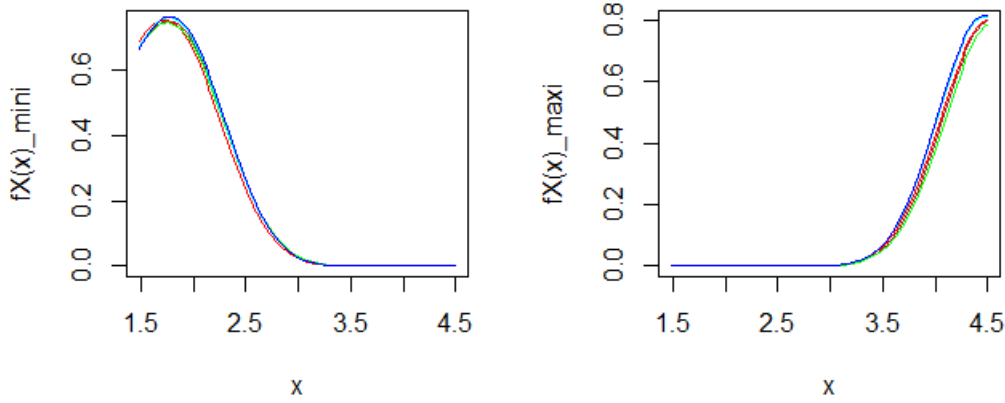


FIGURE 1.3.2: Fonction de densité min et max

Dans cette même logique, on peut étudier la fonction de densité des maxima en utilisant la relation (1.3.3), on obtient :

$$f_{X_{10:10}}(x) = 10 \cdot f_{3.769, 3.526}(x) \cdot [F(x)]^9.$$

La figure (1.3.2) qui présente à gauche  $f_{X_{1:10}}(x)$  et à droite  $f_{X_{10:10}}(x)$ , pour les 5 lots, confirme le fait que les valeurs élevées de  $f_{X_{10:10}}(x)$  excèdent la valeur de  $4\mu m$ , qui est la limite admissible.

## 1.4 Conclusion

Ce chapitre 1 traite dans un premier temps de l'élaboration de la durée de vie d'un outil dans un processus d'usinage qui sera amené à être robotisé. Une modélisation de la rugosité en fonction de la durée du temps d'usinage et des expérimentations ont permis le calcul de cette durée de vie de l'outil. Dans un second temps, les statistiques d'ordre nous ont permis de prédire, dans le cas d'une contrainte de rugosité plus sévère, le nombre maximal de pièces défectueuses. Cette dernière approche peut s'avérer aussi très utile dans un contexte de lancement de production de pièces en série, où des pré-séries peuvent être réalisées afin de déterminer les critères qualité des produits fabriqués. L'étude de cas considérée consiste en une opération de tournage de finition avec des conditions de coupe bien établies de 5 séries de 10 pièces. Le critère de qualité retenu consiste en le non dépassement d'une rugosité maximale donnée de surface des pièces usinées, sous peine de rejet de la pièce.

La statistique d'ordre extrême appliqué aux différents lots a permis de mettre en évidence le nombre maximal de pièces défectueuses que pourra contenir un lot et ainsi conforter l'approche de maintenance systématique sur l'outil de coupe, sachant que seule l'usure systématique a été considérée dans cette approche.

Une autre problématique intéressante à traiter est de considérer les fautes aléatoires qui peuvent perturber le bon déroulement du processus et surtout d'identifier si cette faute devrait aboutir à un rejet de la pièce. Cette problématique est abordée au chapitre suivant.

# Chapitre 2

## Analyse de la fiabilité d'un outil de coupe en usinage

### 2.1 Introduction

La prise en compte de l'usure systématique de l'outil a été décrite au chapitre 1, mais dans le cas d'un usinage, d'autres phénomènes aléatoires peuvent apparaître tels les microcassures du bec de l'outil. Ces derniers peuvent se traduire par des dégradations de la surface usinée, et finalement un rejet de la pièce produite. Les expériences dans Nouredine *et al.* (2012b) ont montré que, néanmoins, malgré une possible microcassure de l'outil, un phénomène d'autoaffutage de l'outil pouvait intervenir, permettant ainsi de retrouver des pièces validant la tolérance requise. L'observation de la rugosité des surfaces des pièces usinées peut ainsi se traduire par :

- une succession de valeurs conformes au modèle d'usure standard,
- un pic, c'est-à-dire une valeur extrême, due à l'écaillage,
- une décroissance de la valeur de rugosité, due à l'autoaffutage.

Cette séquence d'événements, où apparaît un événement extrême parmi d'autres, incite à penser aux phénomènes modélisés en statistique par la Théorie des Valeurs Extrêmes, TVE. C'est une approche que nous suivrons en réalisant l'analyse de fiabilité par l'écriture d'un modèle à risques proportionnels, prenant en compte les conditions environnementales, et où la fonction de base sera issue de la TVE.

Cette section débute par quelques rappels des concepts de base de fiabilité. Une présentation complète, enrichie de nombreuses références bibliographiques, est présente dans la thèse de Diamoutene (2018). Un modèle à risques proportionnels est ensuite décrit afin d'étudier la fiabilité de l'outil de coupe dans l'application d'usinage, déjà étudiée au chapitre précédent. Une conclusion clôture cette section.



## 2.2 Concepts de base de l'analyse de fiabilité - Rappel théorique

La fiabilité est l'étude de la durée de vie d'un matériel, elle est généralement notée  $R(t)$ , (Reliability). Elle caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné. Soit  $T$  la variable aléatoire associée à l'instant d'occurrence de la faute, sa densité de probabilité est notée  $f(t)$ . La fiabilité est une fonction du temps qui s'écrit :

$R(t) = P(T > t)$ , c'est la probabilité que  $T$  soit supérieur au temps  $t$ , défini comme le temps de fonctionnement ou temps opérationnel.

On appelle fonction de défaillance la fonction  $F$  définie par :

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt, t \geq 0.$$

Le nombre  $F(t)$  représente la probabilité que le système connaisse une défaillance avant l'instant  $t$ , c'est la fonction de répartition de la variable aléatoire  $T$ . Nous avons :  $R(t) = 1 - F(t)$ .

On appelle risque instantané ou « hasard function », noté  $h(t)$ , la grandeur définie par :

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta t} \times \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right], t \geq 0.$$

Il existe aussi le risque cumulé, noté  $H(t)$  et défini par :

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx.$$

Ainsi on peut aussi écrire

$$\begin{aligned} h(t) &= -\frac{dR(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} \\ h(t) &= \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \end{aligned}$$

## 2.3 Modèle à risques proportionnels (proportional hasard model)

Le modèle à risques proportionnels permet d'estimer les effets des covariables influençant les temps de défaillance d'un système.

Dans le modèle à risques proportionnels ou proportional hasard model, la fonction de risque  $h$  relative à un événement dépend du temps mais également de covariables  $Z =$

$(z_1, z_2, \dots, z_n)$  relatives à l'environnement de cet évènement, on a donc  $h = h(t, Z)$ . Plus précisément, on admettra l'hypothèse que la fonction de risques proportionnels est égale au produit d'une fonction de risque de base  $h_0(t)$  qui ne dépend pas des covariables et d'une fonction de risque  $\varphi(Z)$ , dépendant uniquement des covariables  $Z$ . La forme générale des modèles paramétriques à risques proportionnels s'écrit :

$$h(t, Z) = h_0(t) \varphi(Z), \quad (2.3.1)$$

avec :

$h(t, Z)$  la fonction de risque du système, fonction du temps  $t$  et de l'état  $Z$  des facteurs d'influence,

$h_0(t)$  distribution représentant la fonction de risque de base du système, fonction uniquement du temps. Les plus couramment utilisées comme fonctions de risque de base sont les distributions de Weibull, exponentielle, etc. Il faut noter alors que ces distributions sont toutes monotones.

$\varphi(Z)$  une fonction appelée fonction d'influence ou risque d'environnement et qui dépend uniquement de l'état des facteurs d'influence ou variables d'environnement.

## 2.4 Evaluation de la fiabilité d'un outil de coupe

En se plaçant dans le contexte de l'exemple traité dans la section 1.2, il est donc proposé d'évaluer les performances d'un outil de coupe non pas face à l'usure systématique de l'outil, comme déjà réalisé, mais par rapport à certains phénomènes aléatoires comme la microcassure.

### Etude de la performance d'un outil de coupe

Dans le processus d'usinage, il peut donc arriver, de façon totalement aléatoire, que le bec de l'outil de coupe subisse une micro-cassure, ou écaillage, entraînant ainsi une dégradation de la rugosité de la surface des pièces usinées, (augmentation de la valeur de rugosité) mais qui peut être immédiatement atténuée par un auto-affutage de l'outil, qui finalement rehausse la qualité de surface, (diminution de la valeur de rugosité). Des études expérimentales menées par Nouredine *et al.* (2008) ont mis en évidence ce phénomène d'auto-affutage avec la conséquence importante de l'existence de valeurs maximales dans les différents lots de pièces usinées.

Nous choisissons comme fonction de risque de base associée à l'outil de coupe la fonction  $h_0$ . Cette fonction qui est croissante-décroissante, propriété essentielle pour répondre à notre problème, a été établie à partir de la loi standard de Gumbel, issue de la TVE, voir Diamoutene (2018). Il est également montré que les conditions d'opération de l'outil de coupe représentant les variables d'environnement sont traduites par la valeur  $\varphi(Z) = 0,1017$ , valeur établie dans le chapitre 1.2.3. Cette correspondance est assez intuitive mais rend bien compte de la réalité. Néanmoins, des expérimentations supplémentaires seront nécessaires pour mettre en relief une corrélation plus ciblée entre les covariables et les conditions d'expérimentation.

La fonction de risque de base  $h_0(t)$  s'écrit :

$$h_0(t) = \frac{1}{t^2 \left( \exp\left(\frac{1}{t}\right) - 1 \right)}.$$

On obtient donc la fonction de risque, notée fonction de risque GEV, (Generalized Extreme Value) par :

$$h(t, 0.1017) = h_0(t) \cdot \varphi(Z) = \frac{0.1017}{t^2 \left( \exp\left(\frac{1}{t}\right) - 1 \right)}. \quad (2.4.1)$$

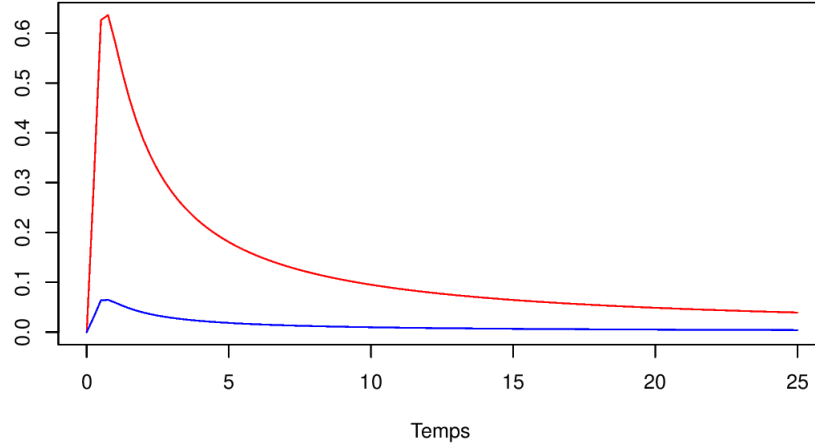


FIGURE 2.4.1: Comparaison entre la fonction de risque de base (en rouge) et le modèle à risque proportionnel GEV (en bleu)

La figure (2.4.1) illustre la fonction de risque de base en rouge et celle à risque proportionnel en bleu et ainsi l'influence des conditions d'opération qui minorent la fonction de risque.

## 2.5 Théorie des Valeurs Extrêmes et contrôle qualité

Lors des expérimentations et tout au long du chapitre 1 consacré au contrôle qualité, une problématique intéressante a été mise en évidence. Dans le cas d'un usinage par lots et si le phénomène de microcassure venait à se répéter périodiquement, générant ainsi sur chaque lot une valeur maximale de rugosité, nous pourrions être amenés à nous interroger sur l'évolution de ce maximum. Sait-on prédire, même si l'on ne dispose de mesures que jusqu'à l'instant  $t_f$ , ce qui se passerait à l'instant  $t > t_f$ ? La

TVE amène des réponses puisque cette valeur maximale est considérée, à juste titre, comme une valeur extrême. Nous présentons les fondements de cette théorie avec des renvois bibliographiques pour approfondissement. La TVE a pour objectif l'étude du comportement asymptotique des grandes ou petites observations d'un échantillon de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (iid). C'est une branche des statistiques qui est apparue dans l'entre deux guerres mondiales, décrite dans les publications de Fisher et Tippet (1928); Fréchet (1927); Gnedenko (1943). L'approche classique en théorie de probabilités s'intéresse principalement au comportement moyen et à la variabilité des phénomènes autour de la moyenne grâce aux outils probabilistes comme, par exemple, la loi des grands nombres ou le théorème central limite. Le théorème fondamental de la TVE donne, quant à lui, les lois limites possibles du maximum de l'échantillon et permet ainsi d'avoir une certaine connaissance sur le comportement stochastique de la queue de distribution.

L'utilisation des lois des valeurs extrêmes repose sur des propriétés des statistiques d'ordre et sur des méthodes d'extrapolation. Plus précisément, elle repose principalement sur les distributions limites des extrêmes et leurs domaines d'attraction. En pratique, on souhaite estimer des quantités dont la probabilité d'observation est très faible, c'est-à-dire proche de zéro. De plus, cette théorie ne vise pas à modéliser ou à estimer la fonction de répartition inconnue dans son ensemble, mais seulement ses queues de distribution qui sont utiles à la représentation des extrêmes. Les deux approches utilisées sont d'une part la méthode des blocs de maxima et d'autre part l'approche de dépassement de seuil ou Peaks Over Threshold (POT), qui modélise la loi des variables excédant un certain seuil fixé au préalable.

Dans notre problématique où l'usinage est réalisé par lot ou bloc, on s'intéressera à l'approche des blocs de maxima et aux différents résultats théoriques de la TVE univariée. L'approche POT, a, quant à elle, été appliquée dans nos travaux sur un cas dans le domaine de l'aéronautique et est détaillée dans Diamoutene *et al.* (2018a).

### 2.5.1 Problématique

La question que l'on peut être amené à se poser dans l'industrie manufacturière est de savoir, dans l'hypothèse d'un usinage par lot, et en considérant qu'au cours de l'usinage de chaque lot il puisse survenir une faute engendrant une valeur extrême, quelle serait alors la loi de distribution de cet extrême (maximum). L'évolution de ce maximum permet de prédire, afin d'en tirer des conclusions, le nombre de pièces hors tolérance. Il est nécessaire, comme toute approche basée sur des statistiques, de disposer d'un grand nombre de pièces usinées.

### 2.5.2 Comportement asymptotique du maximum - Rappel théorique

Nous présentons ici une brève synthèse de la TVE univariée. Pour plus de détails et d'éventuelles démonstrations, on pourra se référer à Embrechts *et al.* (1997). Soit

$(X_n)_{n \geq 1}$ , une suite d'une variable aléatoire indépendante  $X$  et de fonction de répartition  $F(x) = P(X \leq x)$ . Rangeons ces variables aléatoires par ordre croissant, on notera dans la suite l'échantillon ordonné :

$$X_{1:n} \leq \dots \leq X_{n:n}.$$

Une manière simple d'étudier le comportement des événements extrêmes est de considérer les variables aléatoires :

$$M_n = \max \{X_1, \dots, X_n\} \text{ et } W_n = \min \{X_1, \dots, X_n\}.$$

Il faut noter que  $M_n$  et  $W_n$  représentent, respectivement, la plus grande et la plus petite valeur observées sur les  $n$  valeurs observées  $X_1, \dots, X_n$ . Comme les variables aléatoires sont iid, on obtient pour toute réalisation  $x$  :

$$\begin{aligned} P(M_n \leq x) &= P[\cap_{i=1}^n (X_i \leq x)] \\ &= \prod_{i=1}^n P(X_i \leq x) \\ &= \prod_{i=1}^n F(x) \\ &= [F(x)]^n. \end{aligned}$$

La difficulté provient du fait que l'on ne connaît pas, en général, la fonction de répartition  $F$ . C'est la raison pour laquelle on s'intéresse au comportement asymptotique de la variable aléatoire  $M_n$ . Ainsi, en exhibant la famille de loi vers laquelle  $M_n$  convenablement normalisée va converger, on pourra remplacer  $F$  par cette dernière pour les grandes valeurs de  $n$ . De plus, les valeurs extrêmes se trouvent à droite et à la fin du support de la distribution et donc intuitivement le comportement asymptotique du maximum  $M_n$  caractérise la fin de la distribution. On notera par  $x_F = \sup\{x \in \mathbb{R}, F(x) < 1\}$ , le point terminal de  $F$ , c'est-à-dire la borne supérieure du support de  $F$ . Ce point terminal peut être fini ou infini, pour plus de détails voir Embrechts *et al.* (1997).

**Théorème 2.5.1** *Fisher et Tippett (1928); Fréchet (1927); Gnedenko (1943). Soit  $(X_n)_{n \geq 1}$  une suite de  $n$  variables aléatoires iid et de même loi de probabilité  $F$  telle que  $F(x) = P(X \leq x)$ . S'il existe deux suites normalisantes réelles  $(a_n > 0, b_n \in \mathbb{R}, n \geq 1)$  et une loi non dégénérée  $G$  telle que :*

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq x\right) &= \lim_{n \rightarrow +\infty} F^n(a_n x + b_n) \\ &= G(x), \forall x \in \mathbb{R}, \end{aligned}$$

*alors  $G$  est du même type qu'un des trois types de loi suivantes :*

*Loi de Gumbel* ( $\xi = 0$ ) :

$$\Lambda_{\mu,\sigma}(x) = \exp \left( - \exp \left( - \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right), \quad x \in \mathbb{R}. \quad (2.5.1)$$

*Loi de Fréchet* ( $\xi > 0$ ) :

$$\Phi_{\mu,\sigma,\xi}(x) = \begin{cases} \exp \left( - \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right) & \text{si } x > \mu \\ 0 & \text{si } x \leq \mu \end{cases}.$$

*Loi de Weibull* ( $\xi < 0$ ) :

$$\Psi_{\mu,\sigma,\xi}(x) = \begin{cases} \exp \left[ - \left( - \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right] & \text{si } x < \mu \\ 1 & \text{si } x \geq \mu \end{cases}.$$

Les trois lois de probabilité ci-dessus sont appelées lois des valeurs extrêmes, comme montré dans Resnick (1987). Il faut aussi signaler que chacune des trois lois des valeurs extrêmes peut s'obtenir par une transformation fonctionnelle de l'autre. D'une manière analogue, on définit les lois des valeurs extrêmes associées au minimum, que nous ne développons pas ici.

Le théorème suivant établit l'unification des trois types de loi en une loi unique dite distribution généralisée des valeurs extrêmes pour le maximum.

**Théorème 2.5.2** *Resnick (1987) Soit  $(X_n)_{n \geq 1}$  une suite de variables aléatoires iid de fonction de répartition  $F$ . S'il existe deux suites normalisantes réelles  $(a_n)_{n \geq 1} > 0$  et  $(b_n)_{n \geq 1} \in \mathbb{R}$  et une loi non dégénérée  $G_\xi$  telle que :*

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} P \left( \frac{X_{n,n} - b_n}{a_n} \leq x \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} F^n(a_n x + b_n) \\ &= G_\xi(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}, \end{aligned}$$

*alors  $G$  est donnée par :*

$$G_{\mu,\sigma,\xi}(x) = \exp \left( - \left( 1 + \xi \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right), \quad (2.5.2)$$

*où  $x$  est tel que  $1 + \xi \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) > 0$ ,  $-\infty < \mu < +\infty$ ,  $\sigma > 0$  et  $-\infty < \xi < +\infty$ .*

*Les paramètres  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\xi$  sont respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme.*

Le comportement limite du maximum normalisé est ainsi décrit par la fonction de répartition  $G_{\mu,\sigma,\xi}(x)$  pour la plus grande partie des lois usuelles. Ainsi,  $G_{\mu,\sigma,\xi}(x)$  est appelée fonction de répartition de la loi des valeurs extrêmes, en anglais « Generalized Extreme Value distribution » notée GEV.

L'unification de la loi standard de la distribution généralisée des valeurs extrêmes en une seule fonction de répartition facilite l'étude du comportement du maximum ou du minimum. De plus, pour  $\mu = 0$  et  $\sigma = 1$ , on obtient la forme standard des trois types de loi des valeurs extrêmes. Cette loi dépend du seul paramètre de forme  $\xi$  appelé indice des valeurs extrêmes, ainsi la relation (2.5.2) devient :

$$G_{\xi}(x) = \exp \left( - (1 + \xi x)^{\frac{-1}{\xi}} \right), \xi \neq 0, \text{ avec } (1 + \xi x) > 0. \quad (2.5.3)$$

Le cas  $\xi = 0$ , dans la relation (2.5.3) peut être vu comme le cas limite lorsque  $\xi \rightarrow 0$ . On retrouve alors la loi de Gumbel ayant pour fonction de répartition :

$$G_0(x) = \exp(-\exp(-x)).$$

La figure (2.5.1) représente les fonctions de répartition et de densité pour la forme standard unifiée des lois des valeurs extrêmes.

1. Pour  $\xi = 1$ , loi de Fréchet, en bleu, où le support de la loi est  $[-1, +\infty[$ ,
2. pour  $\xi = -1$ , loi de Weibull en rouge où le support de la loi est  $] -\infty, 1]$ ,
3. pour  $\xi = 0$ , loi de Gumbel en noir où le support de la loi est  $\mathbb{R}$ .

Les limites des supports des lois sur les graphiques ne sont pas indiquées sur cette figure 2.5.1.

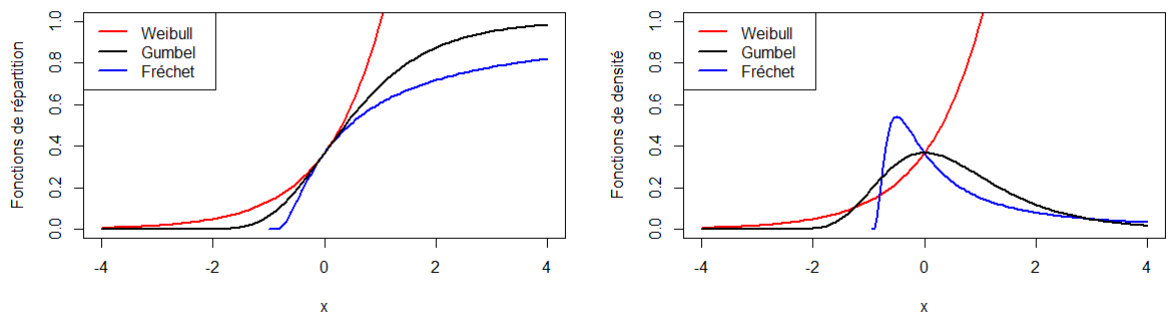


FIGURE 2.5.1: A gauche fonctions de répartition, à droite fonctions de densité des lois des valeurs extrêmes

Dans la TVE, les informations les plus importantes se trouvent dans la queue de la distribution et sont caractérisées par le paramètre de forme  $\xi$ .

Cette théorie est sans aucun doute d'un grand apport, à partir du moment où le phénomène considéré, génère une valeur maximale qu'il convient de surveiller et si bien sûr le nombre d'observations est suffisamment grand.

## 2.6 Conclusion

La prise en compte d'évènements rares tels le bris d'outil, suivi d'un possible autoaffutage, est considérée dans ce cas d'étude. La dégradation, puis l'amélioration de la rugosité imposent la prise en compte d'une fonction de base croissante puis décroissante. Cette approche par modèle à risques proportionnels permet de tenir compte de l'environnement et, dans notre cas, des conditions de coupe.

L'apport de la TVE est aussi montré quand il s'agit de surveiller et de prédire l'évolution de la valeur maximale de la rugosité des pièces usinées par lot.





# Chapitre 3

## Tolérance aux fautes en robotique

### 3.1 Introduction

Précisons la terminologie que nous adoptons au cours de ce chapitre. Un système technologique peut être sujet à des usures, des déviations, des défauts, des perturbations, des dysfonctionnements, des pannes, des erreurs, des défaillances, voire des fautes. Nous utilisons dans notre travail la terminologie défaillance ayant pour cause une faute.

La tolérance aux fautes est un des moyens d'accroître la sûreté de fonctionnement des systèmes. Tout système technologique peut, malgré une conception rigoureuse, présenter des fautes. Ces dernières peuvent entraîner, dans certaines conditions, des conséquences désastreuses.

La tolérance aux fautes est principalement basée sur la prévision des actions à mener pour assurer au système la continuité de sa fonction malgré la présence de fautes et, à la limite, d'interdire les situations dangereuses engendrées par ce nouvel état. Sa mise en oeuvre passe par le traitement de ces fautes qui peut être automatique ou assisté par un opérateur. Il est au préalable nécessaire d'analyser le système afin de mettre en évidence les fautes susceptibles de provoquer une défaillance, de détecter la faute et de localiser la partie de la structure à l'origine de la faute. Ce sont les étapes de détection et de localisation. Une architecture redondante, ou une accommodation, permettent alors par reconfiguration d'assurer un service dit normal. La section 3.2 présente les outils de l'analyse structurelle et est inspirée de nombreuses publications réalisées dans le domaine. Le sous chapitre 3.3 relatif à la détection de fautes présente une approche théorique sur la conception de résidus structurés à partir d'observateurs d'ordre réduit. Cette partie est inspirée des travaux de la thèse de Larroque (2008), soutenue à l'Université de Toulouse en 2008. Les aspects d'accommodation de fautes sont l'objet du dernier sous chapitre 3.4.

## 3.2 Analyse du robot pour la surveillance

L'analyse est une étape critique dont dépend toute la qualité du travail d'obtention ou d'amélioration de la sûreté de fonctionnement du système. Elle guide le choix des solutions et la définition des moyens de mise en oeuvre de ces dernières. Il n'existe pas de méthode générale qui convienne à tout système. Seul peut être dégagé comme trait dominant le principe d'une approche par affinements successifs allant du général vers le particulier.

Plusieurs méthodes d'analyse sont disponibles, telle la méthode de l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticité, AMDEC, la méthode de l'analyse préliminaire des dangers, le diagramme de fiabilité, les arbres des défaillances, etc. Le choix d'une méthode dépend de la nature du système et du degré de connaissance de ce système. Pour le robot, nous considérons, à l'instar des systèmes dynamiques, trois niveaux : fonction, structure et comportement.

- La fonction du robot consiste, sur le plan dynamique, à assurer son évolution depuis un état de départ connu vers un état final défini. C'est généralement un positionnement et une orientation de l'organe terminal, aussi appelé effecteur, dans l'espace. Cette fonction dépend de l'environnement et du contexte particulier dans lequel doit évoluer le robot.
- La structure du robot relève de caractéristiques mécaniques, électriques et informatiques et peut varier considérablement d'un robot à un autre. La structure mécanique est organisée en deux parties distinctes :
  - un organe terminal ou effecteur pouvant être un préhenseur ou un outil,
  - une structure articulée composée de corps souples ou rigides assemblés par des articulations pour former une (des) chaîne(s) cinématique(s). L'articulation d'un robot peut être de type rotoïde (rotation) ou prismatique (translation). Dans le cas des robots rigides à chaîne ouverte simple que nous considérons, chaque articulation est liée à un axe (au sens géométrique) et définit un degré de liberté. Le nombre d'axes est le nombre de degrés de liberté du robot, (robot non redondant). La structure articulée comprend les actionneurs, les capteurs (proprioceptifs et extéroceptifs) et d'autres composants utilisés tels que les engrenages, les freins, etc.
- le comportement : la modélisation au niveau dynamique a un rôle important pour la simulation et le contrôle du robot. La modélisation consiste à décrire, sous forme d'équations non linéaires, le mouvement du robot. Ce mouvement peut être décrit soit dans l'espace opérationnel, soit dans l'espace articulaire. L'environnement du robot intervient souvent d'une manière complexe et il est nécessaire d'analyser ses interactions avec le système. Nous considérons un environnement simple et dégagé (sans obstacle) qui constitue le domaine accessible au robot.

### 3.2.1 Méthodes d'analyse

La connaissance des différents aspects d'un système n'a pas, au départ, le même degré de raffinement. La connaissance de la structure matérielle est généralement la plus accessible. La première étape concerne la décomposition du robot, ensuite sont appliquées les méthodes d'analyse sur le plan structurel qui permettent de déterminer les faiblesses et les possibilités de modification de structure pour la tolérance aux fautes. Nous avons adapté ces méthodes en prenant en compte l'aspect comportemental que nous avons intégré dès le départ dans le tableau AMDEC, Nouredine *et al.* (2009).

#### 3.2.1.1 Décomposition du robot

Nous considérons un robot à  $n$  degrés de liberté de type rotoïde ou prismatique et motorisé par  $n$  moteurs électriques à courant continu et aimants permanents. Les moteurs sont équipés de réducteurs et certains moteurs sont également équipés de freins. La mesure de position de chaque axe est réalisée grâce à un codeur optique (codeur absolu) solidaire de l'arbre moteur. Un convertisseur tension courant est prévu pour chaque moteur avec asservissement de courant. Le domaine accessible au robot est fixé par les valeurs de débattement de chaque axe. Des capteurs de fin de course sont prévus sur chaque axe pour interdire au robot de sortir de son domaine de travail.

Nous pouvons effectuer la décomposition du robot en considérant son organisation matérielle. Le robot est vu comme un ensemble de corps articulés et la décomposition est effectuée simplement par le recensement des composants de chaque axe. Nous pouvons aussi effectuer la décomposition en respectant le découpage général déjà avancé (actionneurs, processus, capteurs) et en détaillant chaque sous-système.

La première forme de décomposition est à caractère matériel (physique); de ce fait, les composants de chaque axe sont recensés indépendamment de leur fonction. La deuxième forme de décomposition revêt un caractère fonctionnel où seuls apparaissent les composants relatifs à la fonction dynamique du robot. Ainsi les freins et les capteurs de fin de course ne sont pas pris en considération par cette décomposition, étant donné qu'ils sont liés à la fonction sécurité du robot.

#### 3.2.1.2 Réalisation de l'AMDEC

L'AMDEC est une méthode d'analyse qui permet de recenser pour chaque composant les conséquences de chaque mode de défaillance sur le fonctionnement du système dans le cadre d'une application donnée. La démarche est inductive. A partir d'un mode de défaillance d'un composant et de la structure fonctionnelle du système est dégagée la relation qui existe entre cette défaillance et la dégradation éventuelle du service délivré.

Les résultats (fonctions, modes de défaillances, causes et conséquences) sont résumés dans un tableau. Ces résultats ne sont pas exhaustifs, ils résument les cas

les plus vraisemblables établis sur la connaissance générale des systèmes et à partir de certains documents sur les circuits électriques, les moteurs et les systèmes mécaniques.

Compte tenu du caractère dynamique du système, il est nécessaire de considérer son comportement et les liens avec les structures matérielles et fonctionnelles pour traiter les problèmes de détection et de diagnostic des fautes. Les résultats de ce type d'étude sont accessibles dans Nouredine *et al.* (2009); Nouredine (1996).

### 3.3 Détection et isolation des fautes

L'importance et le type de la connaissance sur le système surveillé sont primordiaux quant au choix d'une méthode ou technique de détection, voire de détection-diagnostic. Ces méthodes sont essentiellement liées soit aux techniques de l'intelligence artificielle, de la théorie de la statistique ou de la théorie de l'automatique. La connaissance que nous avons du robot se traduit par un modèle analytique et, de ce fait, les techniques de l'automatique sont les plus adaptées. Nous focaliserons sur l'approche qui utilise des observateurs permettant la génération d'indicateurs significatifs de l'occurrence de fautes, indicateurs appelés résidus.

#### 3.3.1 Cas général d'un système dynamique

Les Observateurs à Entrées Inconnues (OEI) sont généralement utilisés lorsqu'il s'agit de s'affranchir des effets des perturbations sur un système. Ils présentent ainsi initialement un grand intérêt dans le domaine du contrôle. De nombreux travaux relatifs à la Détection et Localisation de Fautes, DLF, sont basés sur la conception d'un observateur à entrées inconnues d'ordre plein car ces structures procurent le maximum de degrés de liberté lors de la conception de résidus pour l'isolation de fautes. Toutefois, dans certains contextes, la conception des OEI d'ordre réduit répond bien aux problèmes posés.

L'utilisation d'un observateur d'ordre réduit peut ainsi s'avérer tout aussi performante et une procédure simple est présentée dans Larroque *et al.* (2010) pour estimer des résidus afin de permettre la détection et l'isolation des fautes actionneurs par rapport aux fautes de mesure.

Considérons un système linéaire stationnaire, soumis à  $r$  fautes actionneurs et à  $m$  fautes de mesure, régi par les équations d'état suivantes :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + K_a f_a, \quad (3.3.1)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= Cx(t) + K_m f_m \\ &= \begin{bmatrix} I_m & 0 \end{bmatrix} x(t) + K_m f_m, \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

où à chaque instant  $t$ ,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^r$ ,  $f_a \in \mathbb{R}^r$ ,  $y(t) \in \mathbb{R}^m$  et  $f_m \in \mathbb{R}^m$  sont respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrées connues, le vecteur des fautes actionneurs, le vecteur des sorties du système et le vecteur des fautes de mesure.

Les matrices  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$  et  $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$  sont les matrices constitutives du système d'état. Notons que dans [3.3.2] une structure particulière est utilisée pour la matrice  $C$  écrite en en ligne. Cette forme particulière peut toujours être obtenue grâce à un changement de variables à partir du moment où  $C$  est de rang plein, c'est-à-dire lorsque les  $m$  mesures sont indépendantes.  $K_a \in \mathbb{R}^{n \times r}$  et  $K_m \in \mathbb{R}^{m \times m}$  sont respectivement les matrices de distribution des fautes actionneurs et des fautes de mesure.

Dans une optique de DLF, il est possible d'écrire le système [3.3.1,3.3.2] sous la forme :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^r K_{a_i} f_{a_i}, \quad (3.3.3)$$

$$y(t) = Cx(t) + \sum_{i=1}^m K_{m_i} f_{m_i} \quad (3.3.4)$$

$$= \begin{bmatrix} I_m & 0 \end{bmatrix} x(t) + \sum_{i=1}^m K_{m_i} f_{m_i}, \quad (3.3.5)$$

ce qui signifie que l'on scinde les matrices de distribution en  $r$  vecteurs de distribution pour les fautes actionneurs et  $m$  vecteurs de distribution pour les fautes de mesure. Ainsi,  $f_{a_i}$  correspond à la  $i$ -ème faute actionneur et  $K_{a_i}$  est son vecteur de distribution. Il en est de même pour  $f_{m_i}$  qui correspond à la  $i$ -ème faute de mesure et  $K_{m_i}$  le vecteur de distribution associé.

### 3.3.1.1 Génération de résidu structuré

L'OEI d'ordre réduit conçu doit permettre de générer un résidu structuré  $r_i(t)$  ayant les propriétés suivantes :

- sensible à toutes les fautes actionneurs sauf la  $i$ -ème (donc insensible à une faute actionneur  $f_{a_i}$ ) ,
- sensible à toutes les fautes de mesure  $f_m$ .

L'étage de décision, par la prise en compte des résidus conçus, autorise alors la localisation des fautes actionneurs et la détection des fautes de mesure.

### 3.3.1.2 Dimensionnement de l'OEI et du résidu

En utilisant les principes de base de conception de résidu, voir Larroque (2008), le résidu  $r(t)$  peut être calculé par :

$$r(t) = G_1 z(t) + G_2 y(t), \quad (3.3.6)$$

où  $r(t) \in \mathbb{R}$  et  $z(t) \in \mathbb{R}^q$  sont respectivement le résidu et le vecteur d'observation. Le vecteur d'observation  $z(t)$  est régi par :

$$\dot{z}(t) = Nz(t) + Qu(t) + Ly(t), \quad (3.3.7)$$

avec  $G_1 \in \mathbb{R}^{1 \times q}$ ,  $G_2 \in \mathbb{R}^{1 \times m}$ ,  $N \in \mathbb{R}^{q \times q}$ ,  $Q \in \mathbb{R}^{q \times r}$ ,  $L \in \mathbb{R}^{q \times m}$  et  $T \in \mathbb{R}^{q \times n}$ .

De plus, d'après la forme particulière de la matrice  $C$ , on peut aussi écrire que  $K_m = I_m$ .

Considérant l'observateur défini en [3.3.7], l'erreur d'estimation est donnée par :

$$e(t) = z(t) - Tx(t). \quad (3.3.8)$$

### 3.3.1.3 Equations fondamentales

Les dimensions  $q$  et  $g$  ainsi que les matrices  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $N$ ,  $Q$ ,  $L$  et  $T$  doivent être déterminées afin de satisfaire  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$  dans un mode sans faute. Ainsi, les conditions de convergence asymptotique de l'erreur d'observation définie par [3.3.8], peuvent être établies par :

$$N \text{ est une matrice de Hurwitz,} \quad (3.3.9)$$

$$Q = TB, \quad (3.3.10)$$

$$LC = TA - NT. \quad (3.3.11)$$

En considérant que ces conditions sont vérifiées, la dynamique de l'erreur d'observation est définie par :

$$\dot{e}(t) = Ne(t) - \sum_{j=1}^r TK_{a_j} f_{a_j}(t) + Lf_m(t). \quad (3.3.12)$$

On définit le résidu  $r_i(t)$  comme étant le résidu structuré insensible à la  $i$ -ième faute actionneur ( $i = 1, \dots, r$ ). En remplaçant  $y(t)$ , défini par [3.3.2], et  $z(t)$ , défini par [3.3.8], dans [3.3.6], on obtient :

$$\begin{aligned} r_i(t) &= G_1(e(t) + Tx(t)) + G_2Cx(t) \\ &= G_1e(t) + (G_1T + G_2C)x(t) + G_2f_m. \end{aligned}$$

Ce résidu  $r_i(t)$  ne doit pas dépendre de l'état, ce qui nous impose :

$$G_1T + G_2C = 0, \quad (3.3.13)$$

qui constitue une nouvelle contrainte pour le dimensionnement du système observateur-résidu, au même titre que les contraintes [3.3.9], [3.3.10] et [3.3.11].

Afin de rendre le résidu  $r_i(t)$  insensible à la faute  $f_{a_i}(t)$ , la matrice  $T$  doit être orthogonale à  $K_{a_i}$ . On en déduit alors que :

$$TK_{a_i} = 0 \Leftrightarrow K_{a_i}^T T^T = 0 \Leftrightarrow T^T \in \text{Ker}(K_{a_i}^T). \quad (3.3.14)$$

Ainsi, le résidu  $r_i(t)$  est défini pour  $j \neq i$  :

$$\begin{aligned} r_i(t) &= G_1 e(t) + G_2 f_m(t), \\ \dot{e}(t) &= N e(t) - \sum_{j=1}^r T K_{a_j} f_{a_j}(t) + L f_m(t). \end{aligned}$$

Pour assurer la sensibilité de  $e(t)$  aux fautes actionneurs, il faut s'assurer que :

$$\text{rang}(T K_{a_j}) = \text{rang}(K_{a_j}).$$

Cette condition est communément associée aux équations fondamentales de l'OEI, voir Larroque (2008).

En considérant des fautes actionneurs et de mesure constantes, le résidu  $r_i(t)$  vérifie alors, en régime permanent, la condition suivante :

$$\begin{aligned} r_i &= \lim_{t \rightarrow \infty} r_i(t) \\ &= G_1 N^{-1} \sum_{j=1}^r T K_{a_j} f_{a_j} - (G_1 N^{-1} L - G_2) f_m, \end{aligned} \quad (3.3.15)$$

avec  $r_i \neq 0$  lorsqu'une faute affecte le système, afin que le résidu  $r_i$  soit sensible à toutes les fautes actionneurs et de mesure.

La sensibilité aux seules fautes de mesure impose :

$$G_1 N^{-1} L - G_2 \neq 0. \quad (3.3.16)$$

On considère l'hypothèse généralement admise qu'à un instant  $t$ , il ne peut y avoir occurrence que d'une seule faute. Le vecteur  $f_m$  n'aura donc qu'une seule composante significative et il en résulte alors que [(3.3.16)] peut se réduire à :

$$G_1 N^{-1} L \neq G_2.$$

La sensibilité aux seules fautes actionneurs impose :

$$G_1 N^{-1} \sum_{j=1}^r T K_{a_j} f_{a_j} \neq 0.$$

Pour étudier [3.3.14], écrivons  $T^T$  sous la forme :

$$T^T = V X, \quad (3.3.17)$$

où  $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$  et  $X \in \mathbb{R}^{n \times q}$ . La matrice  $V$  est telle que ses colonnes engendrent  $\text{Ker}(K_{a_i}^T)$  et elle vérifie donc :

$$\begin{aligned} \text{rang}(V) &= \dim(\text{Ker}(K_{a_i}^T)) \\ &= n - \dim(\text{Im}(K_{a_i}^T)) \\ &= n - \text{rang}(K_{a_i}) = n - 1. \end{aligned} \quad (3.3.18)$$



[3.3.18] nous permet aussi de définir l'ordre de l'observateur :  $q = n - 1$ .

L'équation [3.3.14] est résolue à l'aide d'inverses généralisées - Un rappel de la théorie des inverses généralisées est disponible en annexe A de la thèse de Larroque (2008). En considérant [3.3.17], on obtient :

$$K_{a_i}^T V X = 0,$$

avec :

$$V = (I_n - (K_{a_i}^T)^{\{1\}} K_{a_i}^T), \quad (3.3.19)$$

et  $X$  est une matrice arbitraire de taille  $n \times q$ .

La résolution de [3.3.14] à l'aide des inverses généralisées va nous permettre de ne considérer que les composantes de  $T$  nécessaires au dimensionnement. En effet, d'après [3.3.17], le rang de la matrice  $V$  nous indiquera quel est le nombre de composantes de  $X$  devant être calculées. Ainsi, l'utilisation des inverses généralisées ne rajoute pas de composantes à calculer car même si  $V$  est de rang plein, on substitue la résolution d'une matrice  $T$  de taille  $q \times n$  par la résolution d'une matrice  $X$  de taille  $n \times q$ .

En explicitant l'expression de  $T^T$ , [3.3.17] dans [3.3.11], on obtient alors :

$$A^T V X - V X N^T = C^T L^T. \quad (3.3.20)$$

[3.3.20] est une équation de Sylvester. On choisit de prendre pour  $N$  une matrice diagonale,  $N = \underset{i=1}{\overset{q}{diag}}\{N_{ii}\}$ , où les  $N_{ii}$  sont non nuls et doivent être à partie réelle négative.

Les dynamiques de l'observateur peuvent alors être soit :

- arbitrairement choisies. On se retrouve alors dans le cas d'un OEI à dynamiques arbitraires,
- imposées lors du dimensionnement. On se retrouve alors dans le cas d'un OEI à dynamiques fixes. Dans ce cas, il faudra alors s'assurer que les dynamiques imposées par le dimensionnement soient à partie réelle négative afin que  $N$  soit une matrice de Hurwitz.

En utilisant les notations définies précédemment où  $X_i$  représente la  $i$ -ième colonne d'une matrice  $X$  donnée, [3.3.20] peut s'écrire sous la forme de  $q$  équations linéaires indépendantes définies pour  $i = 1, \dots, q$ , par :

$$(A^T V - N_{ii} V) X_i = (C^T L^T)_i. \quad (3.3.21)$$

En considérant la forme de  $C$  décrite dans [3.3.2] et en la remplaçant dans [3.3.21], on obtient pour  $i = 1, \dots, q$  :

$$(A^T V - N_{ii} V) X_i = \begin{bmatrix} (L^T)_i \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.3.22)$$

En résolvant ces  $q$  systèmes, la matrice  $L$  peut entièrement être exprimée en fonction des composantes de  $X$ .

### 3.3.2 Procédure

#### 3.3.2.1 Choix des contraintes pour la DLF

En prenant les notations suivantes pour les 2 termes de [3.3.15] :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_0 & \cdots & 0 & \cdots & a_r \end{bmatrix} &= G_1 N^{-1} \sum_{j=1}^r T K_{a_j} \\ \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & \cdots & \cdots & m_m \end{bmatrix} &= G_1 N^{-1} L - G_2. \end{aligned} \quad (3.3.23)$$

On peut remarquer que chaque faute actionneur est multipliée par une valeur scalaire  $a_j$  dépendant des composantes de  $G_1$  et de  $X$ .

Afin de déterminer ces composantes, l'utilisateur peut s'imposer des contraintes pour les valeurs des  $a_j$ . Par exemple, si la valeur du régime constant du résidu correspondant à un certain type de faute actionneur est trop faible, on pourra s'imposer une valeur plus grande pour  $a_j$  pour améliorer la détection.

Ce raisonnement peut être retranscrit sur les valeurs  $m_j$  pour le traitement des fautes de mesure.

Lors de la résolution des contraintes  $a_j$  et  $m_j$ , il faudra étudier la compatibilité des systèmes obtenus afin de savoir quels choix sont possibles pour faciliter la DLF.

#### 3.3.2.2 Etapes de conception de l'UIO

S'appuyant sur la méthode de résolution, 6 étapes sont mises en évidence :

- **Etape 1** : Calculer la matrice  $V$  par [3.3.19] :

$$V = (I_m - (K_{a_i}^T)^{\{1\}} K_{a_i}^T).$$

- **Etape 2** : Choisir les  $q$  dynamiques de l'observateur notées  $N_{ii}$  pour  $i = 1, \dots, q$ . Ecrire  $N$  :

$$N = \begin{bmatrix} N_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & N_{qq} \end{bmatrix}.$$

- **Etape 3** : A l'aide des  $q$  systèmes linéaires [3.3.22] :

$$(A^T V - N_{ii} V) X_i = \begin{bmatrix} (L^T)_i \\ 0 \end{bmatrix},$$

exprimer  $L$  en fonction des composantes de  $X$ .

- **Etape 4** : A partir de [3.3.13] :

$$G_1 X^T V^T = -G_2 C,$$

exprimer  $G_2$  en fonction des composantes de  $G_1$  et de  $X$ .

- **Etape 5 :** Choisir les contraintes  $a_j$  et  $m_j$  [3.3.23] pour les régimes constants du résidu :

$$\begin{bmatrix} a_1 & \cdots & 0 & \cdots & a_r \end{bmatrix} = G_1 N^{-1} \sum_{j=1}^r T K_{a_j},$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & \cdots & \cdots & m_m \end{bmatrix} = G_1 N^{-1} L - G_2.$$

Résoudre  $G_1$  et  $X$  en fonction des contraintes choisies pour la détection et localisation de fautes.

- **Etape 6 :** Calculer toutes les matrices constitutives de l'observateur et mettre en œuvre le générateur de résidu  $r(t)$ .

On constate que, lors de l'étape 3 de la procédure, l'on choisit arbitrairement les dynamiques de l'observateur que l'on injecte ensuite dans les  $q$  systèmes linéaires [3.3.22]. Cette procédure ne considère donc que le cas des observateurs à entrées inconnues à dynamiques arbitraires.

### 3.3.3 Exemple

Considérons une étude de cas reflétant un mécanisme qui comporterait 2 sorties et 2 entrées (2 actionneurs). Ce mécanisme peut se retrouver si l'on considère un poignet de robot 2 axes découplé de la structure porteuse. Seuls les résultats de calcul des différentes matrices sont donnés, tous les détails sont développés dans Larroque *et al.* (2010).

Le modèle comporte 3 états, 2 entrées et 2 sorties. Les différentes matrices constitutives sont données par :

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & -4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ K_a &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } K_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{3.3.24}$$

Les 2 actionneurs et les 2 capteurs peuvent être sujets respectivement aux fautes actionneurs  $f_{a_1}$  et  $f_{a_2}$  et aux fautes de mesure  $f_{m_1}$  et  $f_{m_2}$ .

Un banc d'observateurs nous permet de détecter et de localiser  $f_{a_1}$  ou  $f_{a_2}$  et de détecter  $f_{m_1}$  et  $f_{m_2}$ . On adopte la démarche suivante :

- construction d'un OEI pour générer un résidu insensible à  $f_{a_1}$ ,
- construction d'un OEI pour générer un résidu insensible à  $f_{a_2}$ .

**3.3.3.1 Résidu insensible à  $f_{a_1}$** 

On considère :  $K_{a_1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ , en suivant les étapes énoncées ci dessus, on calcule les matrices de l'observateur :

$$\begin{aligned} V &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ N &= \begin{bmatrix} -5 & 0 \\ 0 & -6 \end{bmatrix}, \\ Q &= \begin{bmatrix} 0 & 120 \\ 0 & -30 \end{bmatrix}, \\ L &= \begin{bmatrix} 120 & 330 \\ -30 & -114 \end{bmatrix}, \\ G_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 5 \end{bmatrix}, \\ G_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 30 \end{bmatrix}, \\ T &= \begin{bmatrix} 0 & 120 & -30 \\ 0 & -30 & 6 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Le résidu est obtenu par :

$$r_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} r_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\begin{bmatrix} 1 & 5 \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 0 & 30 \end{bmatrix} y(t)),$$

et est donc insensible à  $f_{a_1}$  comme il est montré sur la simulation en figure 3.3.1. Ce résidu possède un régime permanent pour les fautes  $f_{a_2}$ ,  $f_{m_1}$  et  $f_{m_2}$ , qui autorise une décision fiable.

**3.3.3.2 Résidu insensible à  $f_{a_2}$** 

On considère  $K_{a_2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$ . En déroulant la procédure présentée en 3.3.2, on calcule les matrices constitutives :

$$\begin{aligned} N &= \begin{bmatrix} -5 & 0 \\ 0 & -6 \end{bmatrix}, \\ Q &= \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ L &= \begin{bmatrix} -3 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ T &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ G_1 &= \begin{bmatrix} 5 & 6 \end{bmatrix}, \\ G_2 &= \begin{bmatrix} 5 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

le résidu est obtenu par :

$$r_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} r_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \begin{bmatrix} 5 & 6 \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 5 & 0 \end{bmatrix} y(t) \right),$$

et est donc insensible à  $f_{a_2}$  comme il est montré sur la simulation en figure 3.3.1.

### 3.3.3.3 Résultats de simulation

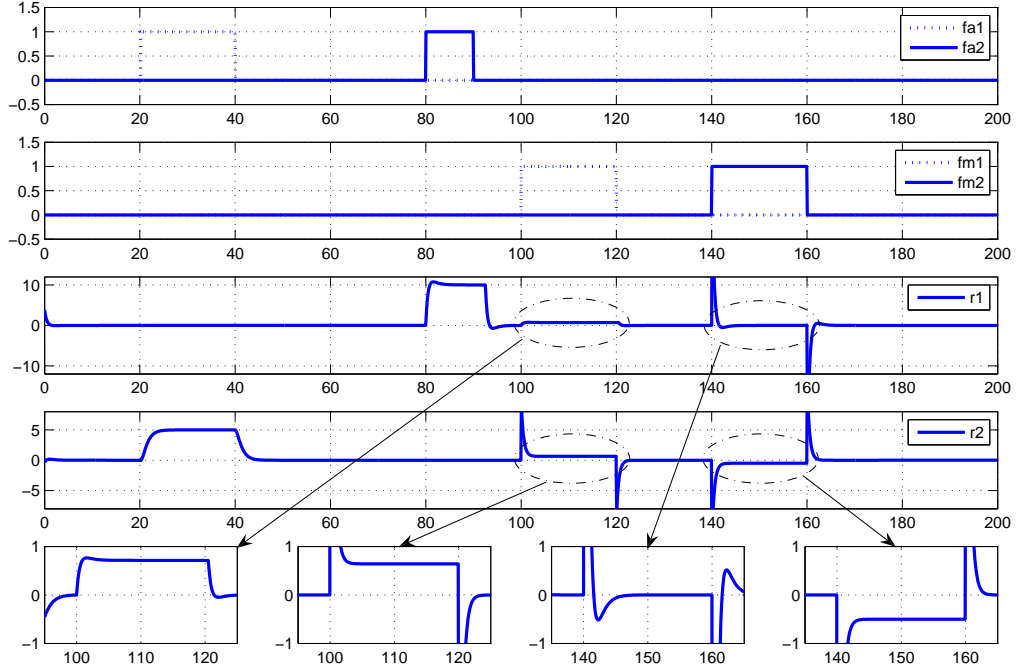


FIGURE 3.3.1: Evolution des résidus suite à l'introduction des fautes

La simulation, dont les résultats sont montrés en figure 3.3.1, comprend :

- l'injection de 2 fautes actionneurs  $f_{a_1}$  et  $f_{a_2}$  sous forme d'offset, avec  $f_{a_1}$  affectant le système pour  $t \in [20; 40]$  et  $f_{a_2}$  affectant le système pour  $t \in [80; 90]$ ,
- l'injection de 2 fautes de mesure  $f_{m_1}$  et  $f_{m_2}$  sous forme d'offset, avec  $f_{m_1}$  affectant le système pour  $t \in [100; 120]$  et  $f_{m_2}$  affectant le système pour  $t \in [140; 160]$ ,
- la génération d'un résidu, noté  $r_1(t)$ , insensible à  $f_{a_1}$ ,
- la génération d'un résidu, noté  $r_2(t)$ , insensible à  $f_{a_2}$ .

Ainsi, comme le montre la figure 3.3.1, nous pouvons détecter et localiser les 2 fautes  $f_{a_1}$  et  $f_{a_2}$  et seulement détecter les fautes de mesure  $f_{m_1}$  ou  $f_{m_2}$ .

Après détection de cette faute, la localisation est réalisée grâce à :

- si  $r_1(t) \rightarrow 0$  et  $r_2(t) \neq 0$ , il s'agit d'une faute sur l'actionneur 1 ( $f_{a_1}$ ),
- si  $r_2(t) \rightarrow 0$  et  $r_1(t) \neq 0$ , il s'agit d'une faute sur l'actionneur 2 ( $f_{a_2}$ ),
- si  $r_1(t) \neq 0$  et  $r_2(t) \neq 0$ , il s'agit d'une faute de mesure  $f_{m_1}$  ou  $f_{m_2}$ .

Le développement de cette partie pose les fondements mathématiques de la construction des résidus à partir d'observateurs d'ordre réduit. Nous avons également travaillé durant la thèse de Larroque (2008) sur la conception d'observateurs d'ordre plein ou sur la conception d'observateurs de fonctionnelles linéaires dans le cas des systèmes invariants dans le temps. Une première approche vers la construction d'observateurs non stationnaires a également été menée et ceci pour s'approcher des conditions réelles de fonctionnement des robots où, par exemple, la matrice dynamique du modèle d'état du robot, équation 3.4.3, dépend du vecteur articulaire, donc du temps.

### 3.3.4 Etude de cas

Le robot considéré appartient à la classe des robots rigides à chaîne ouverte simple, c'est un robot anthropomorphe 5 axes, donné figure 3.3.2. Aux axes 1, 2, 3 et 4 sont associés respectivement les bras 1, 2, 3 et 4 tandis que l'axe 5 permet la mise en rotation de la pince.

Le comportement dynamique est traduit, d'une part, par des variables connues (entrées d'action appliquées et sorties mesurées) et, d'autre part, par le modèle dynamique du robot. Le modèle dynamique direct exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations.

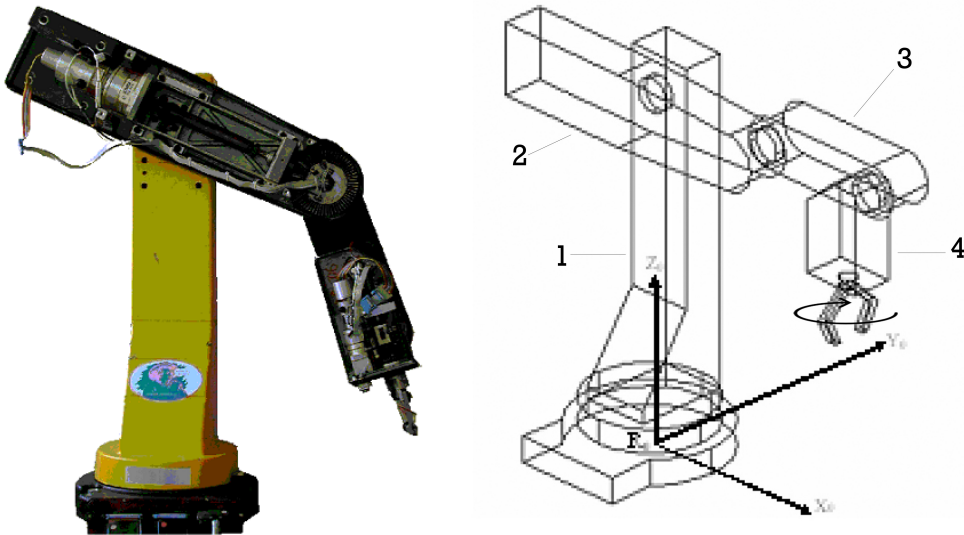


FIGURE 3.3.2: Robot anthropomorphe 5 axes

### 3.3.4.1 Modélisation dynamique du robot et représentation d'état

Pour chaque corps  $i$ , l'équation de la dynamique permet d'écrire, en tenant compte des frottements :

$$\Gamma = H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta),$$

où :

$\Gamma \in \mathbb{R}^5$  est le vecteur des couples articulaires,

$H(\theta) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$  est la matrice d'inertie du robot,

$\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta \in \mathbb{R}^5$  sont respectivement les vecteurs accélération, vitesse et position angulaire,

$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} \in \mathbb{R}^5$  est la matrice des termes de Coriolis et des termes centrifuges,

$g(\theta) \in \mathbb{R}^5$  est le vecteur des forces de gravité.

Les actionneurs sont des moteurs à courant continu. Ces moteurs sont équipés de réducteurs et de freins pour les axes 2 et 3. La loi fondamentale de la dynamique permet d'écrire, en tenant compte des frottements visqueux et sec sur l'arbre moteur :

$$\Gamma_m = I_a\ddot{\theta}_m + F_v\dot{\theta}_m + F_s \text{sgn}(\dot{\theta}_m) + N^{-1}\Gamma,$$

où :

$\Gamma_m \in \mathbb{R}^5$  est le vecteur des couples moteurs,

$I_a = \text{diag}\{I_{a5}\}$  est la matrice diagonale des inerties moteurs,

$\ddot{\theta}_m, \dot{\theta}_m \in \mathbb{R}^5$  est respectivement l'accélération angulaire moteur et la vitesse angulaire moteur,

$F_v = \text{diag}\{F_{v5}\}$  est la matrice diagonale des coefficients de frottement visqueux,

$F_s = \text{diag}\{F_{s5}\}$  est la matrice diagonale des coefficients de frottement sec,

$N = \text{diag}\{N_5\}$  est la matrice diagonale des coefficients de réduction des engrenages.

Grâce aux coefficients de réduction des engrenages, on déduit :

$$\dot{\theta}_m = N\dot{\theta}.$$

De plus, le couple moteur est calculé avec :

$$\Gamma_m = K_{c_i}K_5v, \text{ où :}$$

$K_c = \text{diag}\{K_{c5}\}$  est la matrice diagonale des coefficients de couple,

$K = \text{diag}\{K_5\}$  est la matrice diagonale des gains des amplificateurs de puissance,

$v \in \mathbb{R}^5$  est le vecteur des tensions d'entrées.

Substituer  $\Gamma$ ,  $\ddot{q}_m$  et  $\dot{q}_m$  dans  $\Gamma_m$ , on obtient :

$$\begin{aligned} NK_cKv &= (I_aN^2 + H(q))\ddot{\theta} + \\ &\quad (N^2F_v + C(\theta, \dot{\theta}))\dot{\theta} + g(\theta). \end{aligned} \tag{3.3.25}$$

On déduit :

$$\begin{aligned}\ddot{\theta} = & - (I_a N^2 + H(\theta))^{-1} (N^2 F_v + C(\theta, \dot{\theta})) \dot{\theta} + \\ & (I_a N^2 + H(\theta))^{-1} N K_c K v - \\ & (I_a N^2 + H(\theta))^{-1} g(\theta).\end{aligned}\tag{3.3.26}$$

Introduisons le vecteur d'état :  $x \in \mathbb{R}^{10} : x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \theta_1 & \dots & \theta_5 & \dot{\theta}_1 & \dots & \dot{\theta}_5 \end{bmatrix}^T$ .  
Substituer  $x$  dans (3.3.26) permet d'écrire :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -A(\theta, \dot{\theta})x_1 + B(\theta)v - G(\theta), \end{cases}$$

où  $A(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ ,  $B(\theta) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$  et  $G(\theta) \in \mathbb{R}^5$  avec

$$\begin{aligned}A(\theta, \dot{\theta}) &= (I_a N^2 + H(\theta))^{-1} (N^2 F_v + C(\theta, \dot{\theta})), \\ B(\theta) &= (I_a N^2 + H(\theta))^{-1} N K_c K, \\ G(\theta) &= (I_a N^2 + H(\theta))^{-1} g(\theta).\end{aligned}$$

Sur ce robot, seule la position est mesurée, il en découle le modèle d'état suivant, (3.3.27) :

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -A(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 5)} \\ B(\theta) \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 1)} \\ -G(\theta) \end{bmatrix} \\ y = Cx = \begin{bmatrix} I_{(5 \times 5)} & 0_{(5 \times 5)} \end{bmatrix} x \end{cases}.\tag{3.3.27}$$

Les paramètres du modèle dynamique sont de 2 types :

- Paramètres électriques :  $v$ ,  $K$ ,
- Paramètres mécaniques et électromécaniques :  $I_a$ ,  $F_v$ ,  $F_s$ ,  $N$ ,  $K_c$ ,  $H$ ,  $C$ , et  $g$ .

En résolvant l'équation 3.3.27, il est possible de simuler, en faisant varier les paramètres correspondants, l'occurrence de différentes fautes et d'étudier ainsi leur influence sur la trajectoire du robot. Une étude détaillée de l'influence des différentes fautes est menée dans Nouredine (1996).

### 3.3.4.2 Modélisation des fautes

L'approche modèle d'état conduit classiquement à la différenciation entre fautes de mesure et fautes dynamiques :

- Fautes de mesure

Les fautes de mesure sont essentiellement dues à un défaut sur l'un des 5 capteurs de position (codeurs optiques) qui sont montés sur l'axe moteur des 5 articulations. Pour simuler ce type de fautes, il suffit de générer un offset sur la lecture de sortie du capteur. Le vecteur des fautes de mesure s'écrit :  $f_m \in \mathbb{R}^5$ , il est multiplié dans l'équation de sortie par la matrice de distribution des fautes  $K_m = \text{diag}\{K_{m5}\}$  :



$$y = Cx + K_m f_m,$$

où :

$$f_m = [ f_{m1} \ f_{m2} \ f_{m3} \ f_{m4} \ f_{m5} ]^T.$$

– Fautes dynamiques

Les fautes dynamiques englobent toutes les fautes qui ont leur origine sur le système mécanique articulé, sur les actionneurs ou sur les interfaces électroniques. Ce type de faute se traduit par le vecteur  $f_d \in \mathbb{R}^5$  multiplié par la matrice de distribution des fautes  $K_d = \text{diag}\{K_{d5}\}$ ,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -A(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 5)} \\ B(\theta) \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 1)} \\ -G(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 5)} \\ K_d \end{bmatrix} f_d, \quad (3.3.28)$$

$$\text{où } f_d = [ f_{d1} \ f_{d2} \ f_{d3} \ f_{d4} \ f_{d5} ]^T.$$

Cette forme de représentation d'état est ainsi utilisée pour construire les résidus autorisant la détection - localisation de fautes.

### 3.3.4.3 Exemple d'un étage de commande et détection

Dans le travail de Nouredine (2004), des simulations sous Matlab & Simulink ont permis de montrer l'évolution du résidu suite à l'occurrence d'une faute dynamique. Ainsi, partant de l'équation 3.3.28 et suite à une problématique du robot impliquant une trajectoire points à points, une linéarisation autour d'un point de fonctionnement a été réalisée.

1. Définition de la trajectoire dans l'espace de travail ou espace opérationnel
2. Calcul de la trajectoire dans l'espace articulaire par application du modèle géométrique inverse
3. Linéarisation autour du point de fonctionnement considéré et obtention du modèle d'état linéarisé
4. Calcul du régulateur proportionnel par la méthode de placement des pôles
5. Calcul d'un observateur d'ordre plein - Les positions qui sont également mesurées vont permettre de générer le résidu
6. Calcul du résidu

Le schéma de commande et de détection ainsi que l'évolution du résidu sont extraits de Nouredine (2004) ; voir figure 3.3.3.

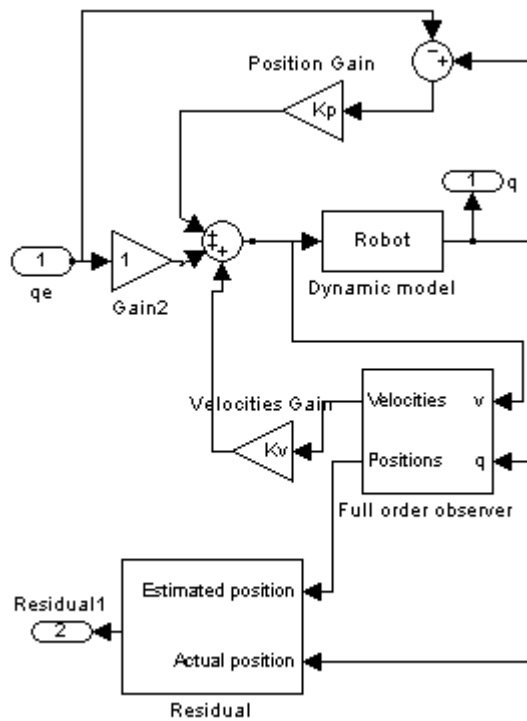


FIGURE 3.3.3: Schéma de commande et de détection

Une faute dynamique est introduite à  $t = 3$  s. A cet instant, une valeur significative du résidu indique l'occurrence de la faute, comme indiqué en figure 3.3.4. Ce résidu a aussi une valeur non négligeable durant le mouvement qu'effectue le robot pour atteindre le point désiré de  $t = 0$  s à environ  $t = 0,75$  s.

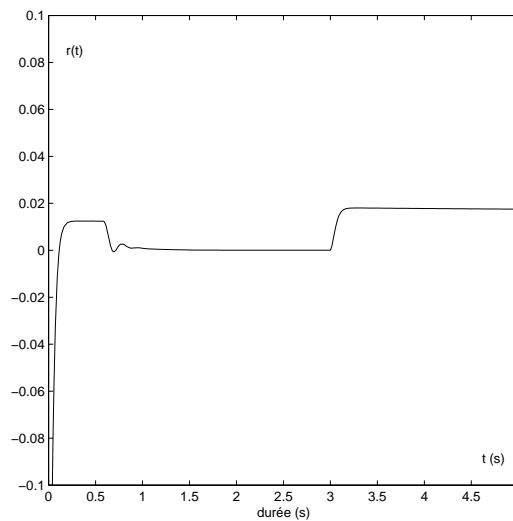


FIGURE 3.3.4: Evolution du résidu avec introduction d'une faute

Les développements de cette section montrent dans quelle mesure la théorie des observateurs et le calcul des résidus peuvent être utilisés comme moyens de détection et localisation quand surviennent des fautes sur le robot.

### 3.4 Accommodation des fautes

L’accommodation est la procédure qui, si elle est possible, permet au système de continuer sa tâche malgré l’occurrence d’une faute. Elle peut permettre au système de basculer dans un mode dégradé et ainsi ne pas imposer de criticité quant au temps d’intervention de maintenance. L’accommodation de fautes, quand elle est activée en ligne de façon automatique dès l’occurrence de la faute, se situe en aval d’une procédure de détection et localisation des fautes et s’inscrit généralement dans des processus dits tolérants aux fautes. Ces techniques d’accommodation sont basées principalement sur des procédures de reconfiguration matérielle et/ou logicielle et il se trouve des situations où des systèmes sont conceptuellement redondants et il est donc intéressant d’utiliser cette redondance afin de doter ces systèmes de capacités d’accommodation des fautes.

Nous présentons des techniques d’accommodation pour des fautes pouvant survenir sur :

- la structure porteuse du robot, (bras 1, 2 ou 3), à savoir le blocage d’un bras,
- l’axe 5, permettant la rotation de l’effecteur,
- la pince, où un serrage défaillant est introduit.

#### 3.4.1 Robot anthropomorphe

Les possibilités de redondance qu’offre un robot anthropomorphe 5 axes sont exploitées afin de pallier à une faute se traduisant par la perte d’un degré de liberté et cette procédure est largement décrite dans Nouredine (2005).

Les robots sont, comme la plupart des systèmes technologiques, sujets à des fautes. Suivant le contexte et l’environnement d’évolution du robot, ces fautes seront plus ou moins lourdes de conséquences. Une analyse détaillée du robot a permis au chapitre 3.2 de mettre en évidence les fautes et les défaillances qui peuvent survenir. Une fois la faute détectée et isolée, des propositions d’accommodation des fautes peuvent alors être définies. La particularité des systèmes tolérants aux fautes est de concevoir ces procédures d’accommodation en ligne et si possible en temps réel. La spécificité des robots manipulateurs est telle que leur tâche inclut généralement un mouvement de l’effecteur et une action suivant la nature de l’outil. La tâche est généralement décrite dans l’espace opérationnel et les conséquences d’une faute sont à analyser dans cet espace. Ainsi, une faute sur le moteur d’un axe pourra entraîner le blocage du bras considéré et cette perte d’un degré de liberté réduira significativement l’espace opérationnel accessible par le robot mais l’on pourra considérer le robot toujours opérationnel dans un mode dégradé, c’est-à-dire dans un espace opérationnel réduit.



$$\left\{ \begin{array}{l} s_x = \cos\theta_1 \cos\theta_{234} \cos\theta_5 + \sin\theta_1 \sin\theta_5 \\ s_y = \sin\theta_1 \cos\theta_{234} \cos\theta_5 - \cos\theta_1 \sin\theta_5 \\ s_z = \sin\theta_{234} \cos\theta_5 \\ n_x = -\cos\theta_1 \cos\theta_{234} \sin\theta_5 + \sin\theta_1 \cos\theta_5 \\ n_y = -\sin\theta_1 \cos\theta_{234} \sin\theta_5 - \cos\theta_1 \cos\theta_5 \\ n_z = -\sin\theta_{234} \sin\theta_5 \\ a_x = \sin\theta_{234} \cos\theta_1 \\ a_y = \sin\theta_{234} \sin\theta_1 \\ a_z = -\cos\theta_{234} \\ P_x = R_5 \cos\theta_1 \sin\theta_{234} + \cos\theta_1 (D_3 \cos\theta_2 + D_4 \cos\theta_{23}) \\ P_y = R_5 \sin\theta_1 \sin\theta_{234} + \sin\theta_1 (D_3 \cos\theta_2 + D_4 \cos\theta_{23}) \\ P_z = -R_5 \cos\theta_{234} + D_3 \sin\theta_2 + D_4 \sin\theta_{23} + R_1 \end{array} \right. . \quad (3.4.2)$$

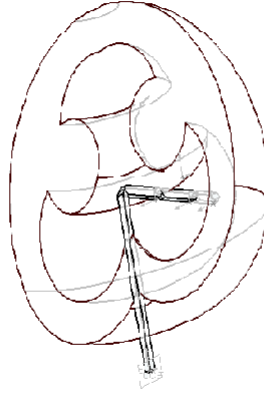


FIGURE 3.4.2: Espace de travail

### 3.4.1.2 Mode sans faute

Le modèle géométrique inverse établi dans Nouredine (2005) permet, à partir de la situation spécifiée dans l'espace opérationnel donné par  $P_x = 0, 30 \text{ m}$ ,  $P_y = 0$ ,  $P_z = 0.80 \text{ m}$  et une orientation spécifiée par  $\theta_{234} = 10^\circ$  et  $\theta_5 = 0^\circ$ , d'établir la configuration articulaire suivante :  $\theta = (\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5)^T = (60^\circ \ -4^\circ \ 45^\circ \ -31^\circ \ 0^\circ)^T$ , montrée en figure 3.4.3.

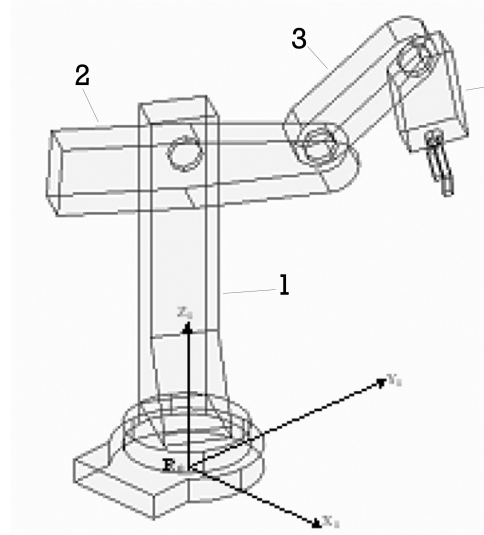


FIGURE 3.4.3: Atteinte du point spécifié en mode normal

### 3.4.1.3 Mode avec fautes

Du fait de la géométrie particulière de ce robot, caractérisée par une longueur du bras 4 non négligeable, on peut considérer que pour positionner un point dans le plan qui contient les bras 2, 3 et 4, nous disposons d'une redondance. Il est bien évident que seule une zone très limitée de l'espace peut être atteinte si un bras est bloqué, le mode de fonctionnement est nettement dégradé mais l'intérêt de cette procédure d'accommodation des fautes est de montrer que, pour certaines situations, même limitées, pouvant néanmoins correspondre à un cahier des charges précis, la tâche pouvait être menée à bien. Nous retenons le principe consistant à recalculer la trajectoire du robot en éliminant l'axe défaillant. Un nouveau modèle géométrique est calculé sur la base d'un robot à 4 articulations. On choisit arbitrairement de considérer que l'axe défaillant est positionné à sa valeur initiale après l'occurrence de la faute.

### 3.4.1.4 Faute sur le bras 3

Pour illustrer cette procédure d'accommodation des fautes, nous considérons une faute sur le bras 3. En le considérant comme positionné à 0, nous recalculons le modèle géométrique inverse pour trouver une configuration alternative, qui est obtenue par  $\theta = (\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5)^T = (60^\circ \ 18^\circ \ 0^\circ \ -8^\circ \ 0^\circ)^T$ . La figure 3.4.4 montre que le même point de l'espace opérationnel est maintenant atteint avec le bras 3 maintenu à 0.

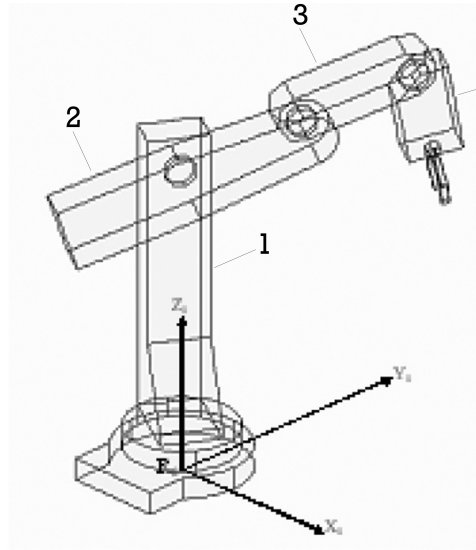


FIGURE 3.4.4: Atteinte du point spécifié avec bras 3 bloqué

D'autres situations de blocage de différents bras sont montrées dans Nouredine (2005).

### 3.4.2 Poignet et pince

Soit le robot anthropomorphe de la section précédente, seul le poignet de ce robot est considéré et notamment le 5ème et dernier axe qui permet une rotation de la pince, voir figure 3.4.5. Une étude des différents étages permettant une détection de fautes sur l'axe 5 et une détection et accommodation de fautes sur la pince ont été menées dans Nouredine *et al.* (2012a). Les fautes considérées dans cette étude concernent :

- l'axe 5 régulé en vitesse de rotation - Une faute entraînera une mauvaise valeur de rotation,
- la pince où la faute considérée provoquera un défaut de serrage.

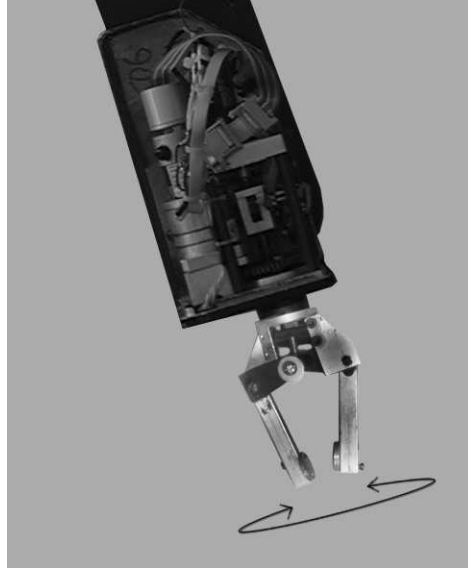


FIGURE 3.4.5: Axe 5 en rotation muni d'une pince

### 3.4.2.1 Détection des fautes sur le poignet (axe 5)

Deux types de faute dynamique sont concernés,  $(f_{d1})$  concerne les fautes pouvant affecter les cartes électroniques de contrôle de l'axe 5 tandis que  $(f_{d2})$ , caractérise des fautes mécaniques, par exemple une augmentation du coefficient de frottement impliquant un ralentissement de la rotation de la pince.

Le modèle d'état discret pour la régulation en vitesse de la pince est donné par :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + f_{dj_k} \\ y_k = x_k + f_{mk} \end{cases}, \quad (3.4.3)$$

où les fautes de mesure et dynamiques sont modélisées par un terme additif.

#### – Génération du résidu

L'observateur est donné par :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = (A - L)\hat{x}_k + Bu_k + Ly_k \\ \hat{y}_k = \hat{x}_k \end{cases}.$$

Cet observateur est tel que son erreur est régie par l'équation 3.4.4 et tend vers 0 en l'absence de faute, avec une dynamique choisie arbitrairement et fixée par le choix de  $(A - L)$ . Cette erreur d'estimation est, dans ce cas, confondue avec le résidu, ainsi  $r_k = e_k$  prendra des valeurs significatives dès l'occurrence d'une faute de mesure ou d'une faute dynamique.

L'erreur suit la loi :

$$e_{k+1} = (A - L)e_k + Lf_{mk} - f_{dj_k}. \quad (3.4.4)$$



### 3.4.2.2 Injection des fautes

Les 3 types de fautes, qui sont à caractère non destructif, sont introduites successivement pour valider l'algorithme de détection. Les différents résultats sont commentés dans Nouredine *et al.* (2012a).

#### – Exemple de traitement d'une faute mécanique

Une faute d'origine mécanique,  $f_{d2}$ , est considérée, elle est introduite en réalisant un blocage manuel de la rotation de la pince, ce qui se traduit, dans le modèle, par une forte augmentation du coefficient de frottement sec. Cette faute est introduite au temps  $t = 3$ s, les courbes de la vitesse mesurée et du résidu sur la figure 3.4.6 traduisent l'occurrence de la faute.

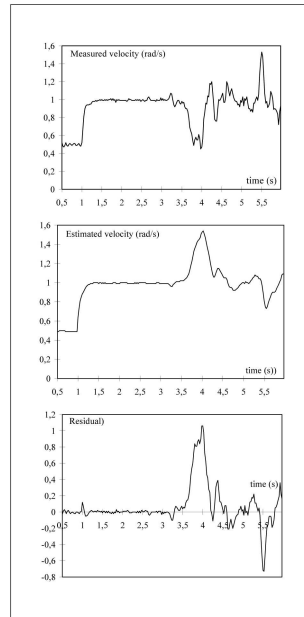


FIGURE 3.4.6: Vitesses et résidu suite à une faute mécanique

### 3.4.2.3 Pince tolérante aux fautes - Reconfiguration matérielle

Proposer une solution de reconfiguration, en assurant une redondance de carte des interfaces électroniques, permet de tolérer les fautes d'origine électronique. Réaliser un système tolérant aux fautes impose une maîtrise totale du mode normal (sans faute) et l'idéal est de concevoir en parallèle les deux modes avec et sans faute. Gérer les problèmes de reconfiguration est quasiment impossible si ce point ne figure pas dans le cahier des charges initial. Nous avons donc abordé le problème de tolérance aux fautes comme un problème à part entière dans la conception du système et c'est ce qui nous a amené à définir, concevoir et implémenter le mode normal en n'ayant pas tout à fait la même approche que dans un problème classique de conception de

commande. La pince de robot, voir figure 3.4.5, est asservie en couple par contrôle du courant.

Puisque seules les fautes électroniques sont considérées, la localisation de la faute se résume à la localisation de la carte défaillante car tous les éléments concernés par l'occurrence d'une faute sont en effet réunis sur une seule et même carte. Le problème de détection-localisation se résoud donc uniquement à un problème de détection, la localisation est implicite. Le système de décision devra alors commuter, en temps réel, la carte redondante pour assurer une continuité du service, voir figure 3.4.7. Ce travail est présenté en détails dans Nouredine *et al.* (2012a).

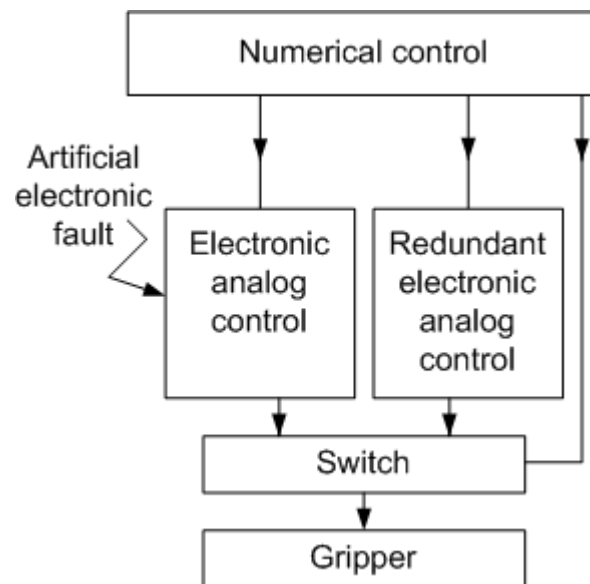


FIGURE 3.4.7: Carte redondante

## 3.5 Conclusion

Ce chapitre fait la synthèse du volet lié aux techniques de l'automatique de ma recherche. Le but d'évoluer vers des systèmes tolérants aux fautes m'a amené à travailler sur l'analyse des fautes qui peuvent survenir sur un système, puis étudier les mécanismes de détection, localisation. Les approches basées sur l'automatique ont été privilégiées, du fait de la connaissance d'un modèle analytique du robot. De plus ce modèle est généralement disponible car indispensable à la commande du robot.



# Chapitre 4

## Synthèse du projet de recherche

### 4.1 Introduction

Mon projet de recherche a pour but de contribuer à la résolution d'un certain nombre de verrous scientifiques qui tendent à freiner la pénétration des robots, surtout dans l'industrie manufacturière, plus particulièrement en parachèvement des pièces usinées et aussi d'oeuvrer à l'amélioration de la surveillance des pièces produites. Mon expérience acquise et présentée tout au long des chapitres 1 à 3 doit me permettre d'aborder le problème de la robotisation dans sa globalité, tant sur le contrôle qualité des pièces produites que sur l'efficacité et donc la rentabilité de la cellule robotisée. J'ai également acquis une réelle expérience en robotisation puisque j'ai été sollicité en tant qu'expert robotique pour la définition et la création de la plateforme Métallicadour, présentée en section 4.4.

Mes recherches menées et présentées aux chapitres 1 et 2 reposent sur l'utilisation de méthodes statistiques pour évaluer la fiabilité de l'effecteur et nous avons capitalisé une expérience certaine que nous pensons maintenant appliquer dans le but d'améliorer le contrôle qualité. En amont, pour ce qui est du fonctionnement du robot, mes différents échanges avec les intégrateurs de cellules robotisées me confortent dans l'idée que des gains substantiels sont à réaliser dans le temps d'apprentissage des trajectoires de robots. Le choix que j'ai réalisé de se focaliser sur les opérations de parachèvement de pièces est motivé par la forte demande, notamment dans le secteur aéronautique, de cellules robotisées et est en rapport avec les performances attendues des robots en termes de précision de suivi de trajectoire.

Le challenge qui se pose aux intégrateurs et donc à leurs clients, les industriels, est de pouvoir réfléchir, imaginer et proposer des solutions d'automatisation de la trajectoire. Les systèmes de Programmation Hors Ligne, PHL, ont nettement progressé et fournissent actuellement des solutions relativement performantes, même si les cibles applicatives sont encore relativement limitées. Nos récents développements avec utilisation d'un capteur de force sont un premier pas vers cette automatisation.

Notre expérience dans la détection, localisation des fautes devrait s'avérer très utile, sachant que la notion de faute peut être remplacée par la notion de perturbation

et permetttre ainsi d'unifier les approches. L'approche multisensorielle, par couplage de système de vision ou de télémètre laser est une piste privilégiée.

Ce quatrième chapitre présente mon futur axe de développement, en mettant en exergue les principaux verrous scientifiques attendus, et en décrivant les 2 plateformes robotiques à l'Enit et à Métallicadour.

## 4.2 Verrous scientifiques et retour d'expérience

Mon choix de travailler sur l'amélioration de la productivité des cellules robotisées m'a incité, dans un souci de cohérence, à considérer les composantes principales interagissant dans ces cellules, ainsi 3 grands axes seront consolidés :

1. la gestion du processus de parachèvement,
2. l'aide à la génération automatique de trajectoire du robot,
3. le contrôle qualité des pièces produites.

Si le point 2 est un élément assez classique dans le monde des roboticiens, les points 1 et 3 sont assez connexes et relèvent respectivement de thèmes que l'on rencontre plutôt dans la communauté des chercheurs en mécanique et en productique. Les travaux présentés et qui seront consolidés dans le futur sont aussi le fruit d'une coopération universitaire entre le LGP de l'Enit et le Laboratoire de Recherche en Fabrication Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran - Algérie.

Cette diversité des verrous scientifiques impose donc l'association de compétences complémentaires, que ce soit en fabrication mécanique, matériaux et en Intelligence Artificielle. Cette mise en commun des compétences, à travers des coopérations internationales, nationales ou au sein même du LGP, sera un élément clé afin d'assurer une pérenité scientifique à cette thématique.

### 4.2.1 La gestion du processus de parachèvement

Le parachèvement consiste souvent en une opération d'ébavurage qui consiste à tout d'abord enlever des bavures d'une pièce préalablement usinée, former l'arête par un chanfrein ou un rayon puis polir les surfaces. Les différents procédés d'ébavurage vont utiliser des outils rigides tels les abrasifs friables (meule en pierre), les outils de coupe (fraise, fraise-lime) ou des outils flexibles tels les brosses ou les mousses.

L'électrobroche doit être choisie en fonction des matériaux des pièces à traiter, tant sur la gamme des vitesses, du couple et de la puissance disponibles.

### 4.2.2 Aide à la génération automatique de trajectoire - Recalage

Ebavurer une pièce à la sortie d'un moule, où les bavures sont naturellement de dimensions aléatoires, nécessite l'apprentissage d'une trajectoire spécifique à la pièce et donc une programmation en temps réel de cette trajectoire. Le but étant de

robotiser l'ébavurage d'un grand nombre de pièces, aussi est-il nécessaire de réduire le temps de programmation au maximum pour chaque pièce pour que cette opération de robotisation soit fructueuse.

Il est donc opportun d'essayer d'apporter plus de flexibilité quant à la gestion de cette trajectoire et de tendre vers la notion de génération automatique de trajectoire ou tout au moins vers un recalage de la trajectoire autour d'une référence, en admettant que les variations des trajectoires seront limitées. Ce problème fait partie de la thématique largement traitée dans la communauté des roboticiens et relève de la planification des mouvements. Pour l'apprentissage de la trajectoire, entre le cas complètement automatique où le robot, couplé à des systèmes de perception de l'environnement, (système de vision 2D, 3D, scanner laser,...) serait capable d'agréger suffisamment d'informations pour générer une trajectoire et le cas généralement répandu qui consiste en un apprentissage de la trajectoire par l'opérateur muni de son pupitre de commande, il est une solution médiane que j'envisage d'investiguer et qui consiste à s'appuyer sur un opérateur, tout en le dotant d'outils de perception pouvant l'aider et réduire ainsi sensiblement le temps de programmation. Des algorithmes d'aide à la décision, voire de l'IA, complèteront nécessairement le niveau perception.

Le recalage d'une trajectoire, qui est en fait un problème entier est nécessairement à réaliser en ligne et en temps réel. La trajectoire du robot est modifiée en cours d'application.

Les sources d'erreurs sont nombreuses et l'on citera :

1. Imprécisions intrinsèques dues à la fabrication de la pièce
2. Imprécisions dues au bridage de la pièce
3. Imprécisions dues à la calibration de l'environnement
4. Erreurs de mise en situation du robot (position et orientation de l'outil)

Les techniques développées au chapitre 3 pourront permettre de contribuer à amener des solutions aux problèmes d'imprécision dans la mesure où la notion de faute peut être remplacée par la notion d'incertitude.

### 4.2.3 **Contrôle qualité des pièces usinées**

Différents moyens de contrôle de la qualité des pièces produites peuvent être implémentés. L'instrumentation déployée reste un point clé et peut atteindre des budgets significatifs qui peuvent déséquilibrer le budget global d'une cellule robotisée. Les moyens de surveillance qui peuvent être installés en ligne et fournir en quasi temps réel des relevés sont aujourd'hui disponibles et l'étude de rentabilité justifiera ou non ce type d'acquisition. Les approches statistiques que nous avons déployées au cours de nos travaux au chapitre 1 amènent des réponses à partir du moment où le nombre de données mesurées est suffisamment grand.

Les principaux contrôles portent, dans le cas d'ébavurage de pièces sur les chanfreins ou arrondis et sur la rugosité de surface des pièces.

### 4.3 Plateforme IRP

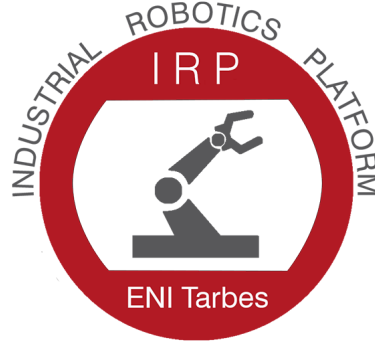


Figure 4.3.1: Logo IRP

Suite à une réponse favorable d'un appel à projet IDEX-Toulouse, mené à terme en juillet 2016, le Laboratoire Génie de Production de l'Enit, LGP, sous mon impulsion, a fait l'acquisition d'un robot industriel KUKA KR 120ha pouvant s'adapter à des opérations de parachèvement de pièces. J'ai été chargé de la gestion de ce dernier équipement depuis l'écriture du CCTP jusqu'à l'installation de cette cellule en septembre 2017 comme nouvel outil de recherche au LGP et j'en suis aujourd'hui le responsable. Ce robot, associé au matériel déjà existant, a permis la création d'une plateforme opérationnelle, IRP, pouvant constituer un support en vue d'implémenter des démonstrateurs pour valider de nouvelles solutions scientifiques et technologiques.

- Le robot KUKA KR 120 ha, équipé d'un capteur de force et d'une ponceuse, voir figure 4.3.2,
- Des effecteurs pneumatiques (meuleuse et ponceuse), électrique (meuleuse),
- Un robot KUKA KR 6 déjà présent au LGP et plutôt orienté manipulation car équipé d'une pince pneumatique, voir figure 4.3.3,
- Un système de vision de National Instruments avec logiciel de traitement d'images associé à une licence académique qui comporte une bibliothèque complète fonctionnant sous Labwindows ou Labview,
- Des logiciels de simulation et programmation hors-ligne tels les logiciels Delmia (Dassault Systèmes), Delcam (Autodesk) et KukaSimpro.

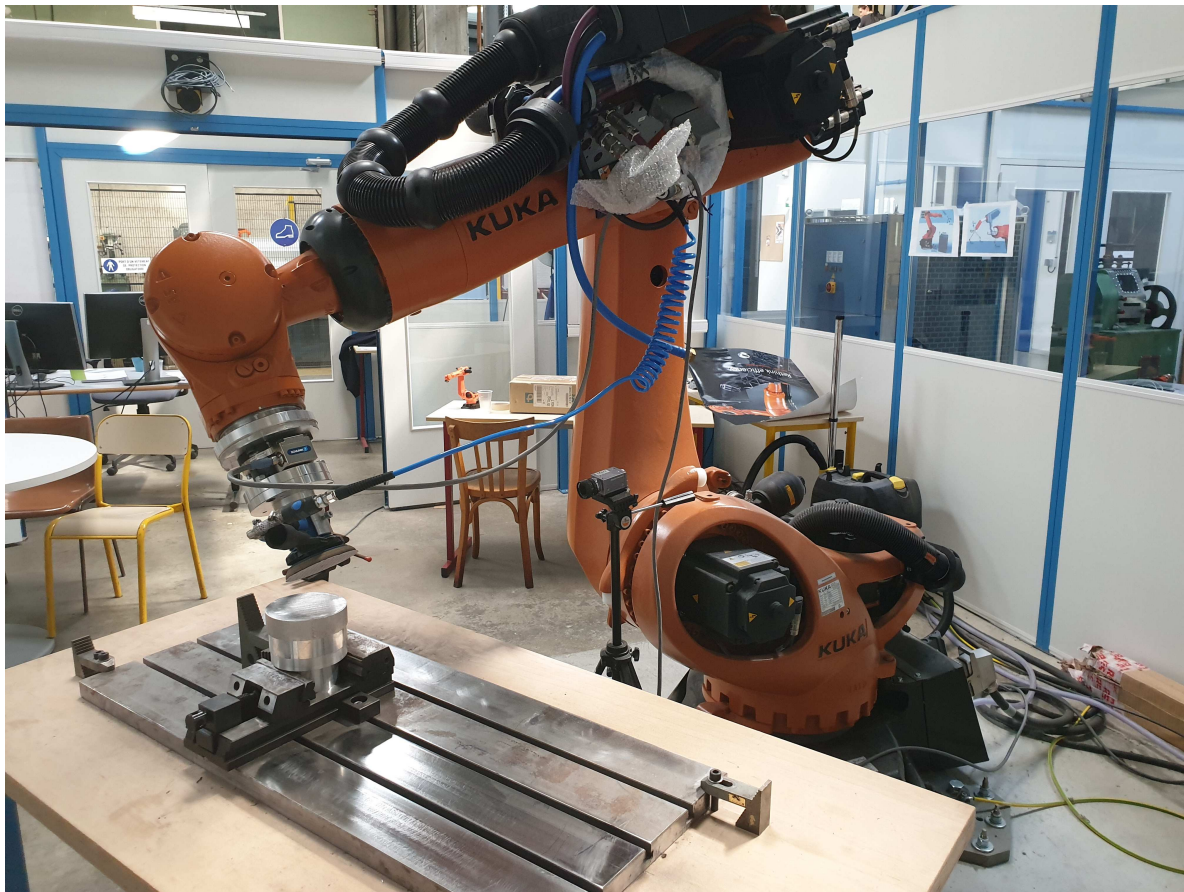


FIGURE 4.3.2: Robot KR 120 équipé pour le ponçage

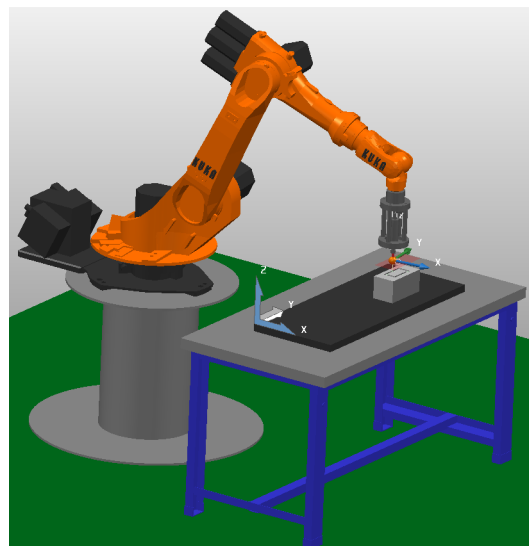
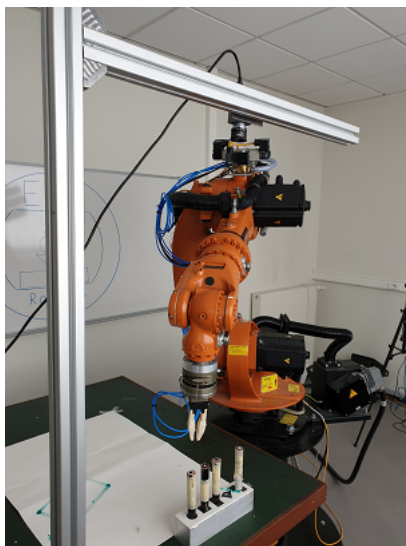


FIGURE 4.3.3: Robot KR6 et son modèle CAO



## 4.4 Plateforme Métallicadour

Inauguré le jeudi 1er décembre 2016 sur le site Aéropolis à Bordes-Assat, 64000, Métallicadour est un centre de Recherche et Développement, financé par le Conseil Régional de Nouvelle-Aquitaine. Son but est de favoriser l'émergence d'innovations technologiques dans les entreprises industrielles. Ce centre procure également une plateforme technologique de pointe pour les formations continues assurées par le Pôle formation Adour.

L'Enit est associé à toutes les étapes depuis le début de ce projet, soit fin 2012 pour la préparation du business plan jusqu'à ce jour. Pour ma part, j'ai été chargé de définir, dès juin 2013, le volet du pôle robotisation, à savoir la définition des besoins des industriels jusqu'à la rédaction des CCTP, (Cahier des Clauses Techniques Particulières, régissant les appels d'offres des marchés publics), et enfin de la réception du matériel et de l'organisation des formations. Le budget alloué au pôle de robotisation était de 520 K€. J'ai assuré cette mission confiée par la Direction de l'Enit dès juin 2013 avec mes premières concertations industrielles, mission qui s'est achevée par la réception des derniers matériels et l'organisation des formations en mars 2016. Ce travail s'est avéré très enrichissant du point de vue de l'expérience acquise et m'a permis d'approfondir mes contacts du monde industriel, que ce soit les grands groupes tels Safran, Dassault présents sur le bassin de l'Adour ou en direction des PME, très présentes dans le domaine de la sous traitance aéronautique.

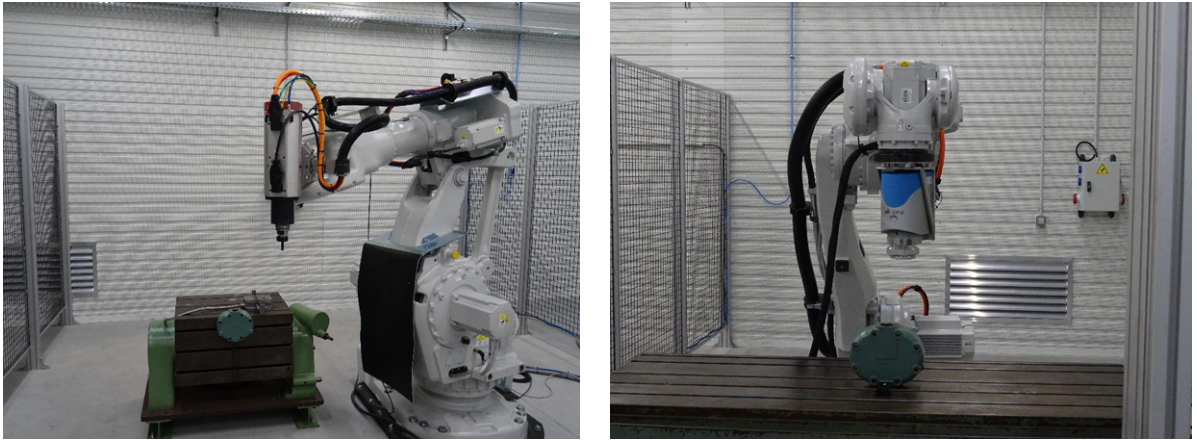


FIGURE 4.4.1: Cellules de la plateforme Métallicadour

La figure 4.4.1 représente deux des quatre robots de la plateforme métallicadour. Le robot de gauche, ( ABB 6660), est équipé d'une électrobroche de 18 KW tandis que le robot de droite est équipé d'un système optique de mesure de rugosité, (Alicona R25).

# Conclusion générale

La rédaction de ce document a comme fil directeur la volonté d'assurer un équilibre entre les 3 composantes essentielles d'une cellule robotisée : le robot, le processus et la qualité des pièces obtenues. L'obtention d'une qualité répondant aux spécifications du cahier des charges est obligatoire, d'où l'importance des étages de surveillance et des techniques associées développées tout au long des chapitres 1 et 2. Une qualité donnée est bien sûr étroitement liée aux performances du robot qui porte l'électrobroche, aussi est-il impératif que les performances en précision du robot soient suffisantes. La tolérance aux fautes, qui permet une meilleure disponibilité du robot participe à l'augmentation de la productivité de la cellule. Enfin, toutes ces conditions préalables, étant remplies, et pour encore améliorer cette productivité, le temps de programmation des trajectoires doit être court devant le temps réellement opérationnel du robot. Cette dernière considération justifie l'intérêt porté à la génération automatique de trajectoire.

L'animation de la plateforme technologique, IRP de l'Enit et donc sa montée en puissance est le projet qui constituera l'aboutissement de ma carrière d'enseignant chercheur. La prise en compte de recherches appliquées inspirées de problèmes identifiés directement du monde industriel me rend confiant quant à la pérennité financière de cette plateforme pour assurer le financement de projets de recherche.

L'ambition que je porte pour cette plateforme et son développement m'a incité à soutenir mon Habilitation à Diriger des Recherches et ce dernier diplôme me permettra, je l'espère, d'assurer, à la tête de cette plateforme, une animation avec une légitimité et une crédibilité scientifique reconnues.



# Chapitre 5

## Rayonnement scientifique - Publications et encadrements

Ce chapitre est un catalogue recensant principalement mes publications ainsi que la liste détaillée de mes encadrements.

### 5.1 Publications

#### 5.1.1 Thèse

- Farid NOUREDDINE, Vision tridimensionnelle panoramique par télémétrie  
Doctorat de l’Institut National des Sciences Appliquées de Rennes – Discipline : Robotique, Soutenue le 03/07/1987

#### 5.1.2 Publications soumises en attente de décision (ACL)

- Asmaa Motrani, Rachid Nouredine, Farid Nouredine, Performance evaluation of data-driven methodology related to C-MAPSS dataset, soumis à ISA Transactions en Octobre 2019.

#### 5.1.3 Publications parues

##### 5.1.3.1 (ACL) - 9

- Abdoulaye Diamoutene, Farid Nouredine, Rachid Nouredine, Bernard Kamsu-Foguem, Diakarya Barro, Proportional hazard models for cutting tool recovery in machining, Journal of Risk and Reliability - October 2019  
<https://doi.org/10.1177/1748006X19884211> - JCR
- Abdoulaye Diamoutene, Bernard Kamsu-Foguem, Farid Nouredine, Diakarya Barro. Prediction of U. S. General Aviation fatalities from extreme value approach. Transportation Research Part A, Policy and Practice, volume 109,

March 2018, Pages 65-75, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.01.022> - JCR

- Abdoulaye Diamoutene, Farid Nouredine, Bernard Kamsu-Foguem, Diakarya Barro, Quality control in machining using order statistics. Measurement, Elsevier, Volume 116, February 2018, Pages 596-601, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.036> - JCR
- Boukezzi, F., Nouredine, R., Benamar, A. and Nouredine, F., 'Modelling, prediction and analysis of surface roughness in turning process with carbide tool when cutting steel C38 using artificial neural network', Int. J. Industrial and Systems Engineering, Vol. 26, N°. 4, pp.567-583, 2017
- Abdoulaye Diamoutene, Diakarya Barro, M. A. Serge Somda, Farid Nouredine and Bernard Kamsu Foguem, Survival analysis in living and engineering sciences. JP Journal of Biostatistics Volume 13, Issue 2, Pages 223 – 238, 2016
- B. Larroque, F. Nouredine, F. Rotella, Procedure for constructing linear functional observers, International Review of Automatic Control, Vol. 6, N°2, 2013
- R. Nouredine, F. Nouredine, A. Benamar, Surface roughness measurement for model-based fault detection in turning process, International Review of Mechanical Engineering, (IREME), Vol. 6, N° 7, p. 1411-1417, 2012
- Nouredine Farid, Larroque Benoît, Rotella Frédéric, Fault tolerance in robotics, Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems, Vol. 2, No. 3, pp.294–310, 2009
- B. Larroque, F. Nouredine, F. Rotella, Towards a complete design of linear functional observers, International Review of Automatic Control p132-142 Ed. Praise, ISSN 1974-6059, 2008

#### 5.1.3.2 (ACLN) - 4

- F. Nouredine, Une expérience pédagogique autour d'un robot industriel, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, (J3eA), 12, 2013, <http://dx.doi.org/10.1051/j3ea/2013001>
- B. Larroque, F. Nouredine, F. Rotella, Modélisation d'observateurs à entrées inconnues pour la détection de fautes actionneurs et la localisation de fautes de mesure, Journal Européen des Systèmes Automatisés, volume 44, n° 2/2010
- Nouredine Rachid, Benamar Ali, Nouredine Farid, Maintenance prédictive de l'outil de coupe en usinage, Mécanique & Industries Vol.9 N°3 p205-212 Ed.

EDP, 2008

- Farid Nouredine, Conception d'un outil logiciel graphique pour l'analyse comportementale d'un robot en mode dégradé, *Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique*, volume 11-n° 1-2, 1996

### 5.1.3.3 (ACTI) - 11

- R. Nouredine, F. Nouredine, A. Benamar, Fault tolerant gripper in robotics, IEEE Conference, 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Research and Education in Mechatronics (REM-MECATRONICS), 13th Int. Workshop, Paris, November 21-23, p. 122 – 127, 2012
- B. Larroque, F. Nouredine, F. Rotella, New residual generation design for fault detection, 17th IFAC World Congress, Volume 17, Seoul, 2008
- F. Nouredine, Fault tolerance of robot manipulators, AVCS'04, International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety, I3M, IFAC, Genova (Italy), 2004
- S. Médar, P. Charbonnaud, F. Nouredine, Active fault accommodation of a three tank system via switching control , Proc. of the 15th IFAC World Congress, Barcelona, 2002
- F. Nouredine, M. Garcia, M. Larrieu, A graphic simulation tool for fault diagnosis in robots, Proc. of the IFAC/IFORS/IMACS Symposium, London, 1995
- F. Nouredine, M. S. Lazeregue, D. Noyes, Fault detection-location in robots using a scheme of observers, Colloque IFAC, SAFEPROCESS'94, Helsinki, 1994
- F. Nouredine, D. Noyès, M. Larrieu, A fault tolerant hardware architecture for robot control, 6th International Conference on System Research Informatics and Cybernetics, Baden-Baden, 1992
- F. Nouredine, S. Monchaud, R. Prat, 3D panoramic vision system by the couplage of range-finding techniques, MIOP'87, vol. 3, 10 A-4, Wiesbaden, 1987
- S. Monchaud, E. Legruyer, R. Prat, F. Nouredine, Calibration and interpretation problems for range pictures in wide field scanning triangulation range-finder for machine vision, *Optical Techniques for Industrial Inspection*, SPIE, Québec City, pp. 174-181, 1986
- J. Shi, S. Monchaud , F. Nouredine , A new 3D sensor for mobile robot location

and artificial pictures synthesis, Robot vision and Sensory Control Conference, Paris, pp.. 139-149, 1986

- S. Monchaud, R. Prat, F. Nouredine, Interaction between sensor specifications and artificial intelligence techniques, Robot vision and Sensory Control Conference, Amsterdam, pp. 177-186, 1985

#### 5.1.3.4 (ACTN) - 17

- Z. Mehar, R. Nouredine et F. Nouredine, (2018), Diagnostic par réseaux neuronaux flous d'une cellule robotisée d'usinage, International Conference on Industrial metrology and maintenance (ICIMM), 28-29 October, Setif, Algeria, 2018
- F. Boukezzi, R. Nouredine et F. Nouredine, (2017), Prédiction de la rugosité de surface par réseaux de neurones, CIGI 2017, Compiègne, France
- R. Nouredine, H. Bouhadiba, F. Nouredine, Réduction des risques industriels par les Systèmes Instrumentés de Sécurité – Application dans l'industrie gazière, 18ème Congrès de Maîtrise des risques et Sûreté de Fonctionnement (λμ18), Tours, France, 16-18 octobre, 2012
- R. Nouredine, A. Benamar, F. Nouredine, Impact de la maintenance préventive dans l'industrie gazière », 3ème édition du Symposium International sur la maintenance et Maîtrise des risques (MMR-2010), pp 215-221, ENIM-Rabat, Maroc, 15-17 Avril 2010
- R. Nouredine, M. Rais, A. Benamar, F. Nouredine, Apport de la décision multicritère pour la classification des équipements critiques », 2ème Congrès des innovations mécaniques (CIM'2010), Sousse, Tunisie, 28-29 Avril 2010
- R. Nouredine, A. Benamar, F. Nouredine, Maintenance basée sur les modes de défaillance dominants - Application à une installation gazière, CPI 2009, Fès-Maroc
- B. Larroque, F. Nouredine, F. Rotella, Procédure pour la localisation des fautes actionneurs et la détection des fautes de mesures sur des systèmes linéaires stationnaires, MOSIM'08, 7e Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation 31 mars - 2 avril 2008
- R. Nouredine, A. Benamar, F. Nouredine, Implantation d'une stratégie de maintenance, Journée d'études sur la maintenance et la législation, LEGIMA 2005, Tlemcen, Algérie

- R. Nouredine, A. Benamar, F. Nouredine, Intégration d'une technique de maintenance prédictive de l'outil de coupe dans une cellule d'usinage robotisée, Pentom 2005, 2ème édition du Colloque International Francophone - Performance et nouvelles technologies en maintenance, Marrakech (Maroc), 18-20 avril 2005
- F. Nouredine, Accommodation de trajectoires d'un robot suite au blocage d'une articulation, Qualita 2005, 6ème Congrès International Pluridisciplinaire. Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Bordeaux, 16-18 mars 2005
- R. Nouredine, A. Benamar, F. Nouredine, Analyse des modes dégradés d'un robot manipulateur, Colloque International de Génie Mécanique, SIGMA'02, Oran, 2002
- F. Nouredine, Préhenseur de robot tolérant aux fautes, Colloque International de Génie Mécanique, SIGMA'02, Oran, Algérie 2002
- F. Nouredine, D. Noyès, M. Larrieu, Un système de vision 3D movil para usos industriales, 3er Congreso de Asociacion Espanola de Robotica, Zaragoza, pp. 85-88, 1993
- F. Nouredine, S. Monchaud, R. Prat, Etude théorique et expérimentale d'un système de vision 3D, OPTO 86, Paris, pp. 219-222, 1986
- F. Nouredine, S. Monchaud, R. Prat, Rayonnement lumineux dans un système de vision 3D, OPTO 85, Paris, pp. 144-146, 1985
- F. Nouredine, Restauration de contours par filtrage dans un système vision 3D, Colloque Maghrébin sur l'Automatique, Constantine, 1988
- F. Nouredine, Carte contrôleur de robots autour de processeurs 16/32 bits, Colloque National sur la Robotique, Oran, pp. 211-215, 1988
- F. Nouredine, Une structure multi-microprocesseurs pour une application robotique, Colloque National sur les Microordinateurs et Systèmes, Arzew, 1988
- J. Shi, R. Prat, S. Monchaud, F. Nouredine, Un nouveau système de localisation 2D ou 3D avec poursuite automatique, Reconnaissance des formes et intelligence artificielle, AFCET-INRIA, Antibes, 1987



**5.1.3.5 (COM) - 4**

- N. Yel, R. Nouredine, F. Nouredine, Model-based approach for fault monitoring in machining , Séminaire Euro-Méditerranéen sur l'Environnement et la Sécurité Industrielle (SEMESI'2011), ENSET-Oran, Algérie, 24-25 Avril, 2011.
- R. Nouredine, M. Rais, A. Benamar, F. Nouredine, Contribution à l'implantation de la MBF au sein du complexe industriel GL1Z, Séminaire Euro-Méditerranéen sur l'Environnement et la Sécurité Industrielle (SEMESI'2011), ENSET-Oran, Algérie, 24-25 Avril, 2011
- F. Nouredine, Tolérance aux fautes dans les systèmes embarqués critiques, Embedded Systems Conference, ESC'09, Alger 2009
- R. Nouredine, A. Benamar, F. Nouredine, Choix d'une stratégie de maintenance - Etude de cas, Conférence Internationale sur la Productique, CIP, Alger, 2003

**5.1.3.6 (OV) - 1**

- S. Monchaud, R. Prat, F. Nouredine, C. H. Chen, Dispositif télémétrique pour la robotique, Le point en robotique, vol. 2, Edition technique et documentation, Lavoisier, 1985

**5.2 Encadrements****5.2.1 Thèse de doctorat en cours - 2**

- M. Cheick Abdoul Kadir A Kounta  
Apprentissage profond pour la fusion multimodale, Co -Tutelle, Univ. Toulouse 3 et Univ. Bamako, soutenance prévue en 2022
- Mlle Z. MEHAR  
Contribution à la mise en œuvre et surveillance d'une cellule robotisée de parachèvement de pièces, thèse de Doctorat 3ème CYCLE - LMD de l'Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed Encadrement de la thèse : Rachid NOUREDINE - Farid NOUREDDINE Soutenance prévue en 2021. Taux d'encadrement : 50 %.

**5.2.2 Thèses de doctorat soutenues - 4**

- M. A. DIAMOUTENE  
Contribution de la théorie des valeurs extrêmes à la gestion et à la santé des

systèmes

Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse soutenue, le 26 novembre 2018 à l'Eni de Tarbes, Cotutelle internationale Université OUAGA1, Burkina Fasso, devant le Jury composé de :

M. M. LEMDANI, Professeur l'Université de Lille 2, Rapporteur

Mme S. MERCIER, Professeur à l'UPPA, Rapporteur

M. B. SALEY, Professeur à l'Université A. Moumouni, Niger, Examineur

F. NOUREDDINE Maître de Conférences à l'Enit, Co-Encadrant

Taux d'encadrement : 50 %

M. D. BARRO, Professeur à l'Université de Ouaga2, Burkina Fasso, Co-Directeur de thèse

M. B. KAMSU, Maître de Conférences à l'Enit, HDR, Directeur de thèse

Poste actuel : Maître Assistant à l'Institut Polytechnique rural de Katibougou, Mali.

– M. R. NOUREDDINE

Implémentation de la maintenance prédictive dans les systèmes de production

Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-ALGERIE, soutenue le 03 décembre 2008 à l'USTO - Algérie devant le jury composé de :

L. BENALI, Professeur à l'USTO, Rapporteur

M. A. ZANOUN, Professeur à l'ENSET-Oran, Rapporteur

M. BOUCHETARA Professeur à l'USTO, Examineur

A. HADJAOUI, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, Examineur

A. BENAMAR, Professeur à l'ENSET-Oran, Directeur de thèse

F. NOUREDDINE Maître de Conférences à l'ENI de Tarbes, Co-Directeur de thèse, Taux d'encadrement : 80%.

Poste actuel : Maître de Conférences à l'Université d'Oran - Algérie

– M. B. LARROQUE

Détection de fautes dans les systèmes non stationnaires

Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, soutenue le 18 septembre 2008 à l'ENI de Tarbes devant le jury composé de :

J.-P. RICHARD, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, Rapporteur

D. MAQUIN, Professeur à l'INPL-Nancy, Rapporteur

M. FADEL, Professeur à l'ENSEIHT-Toulouse, Examineur

Y. TOURE, Professeur au LVR de Bourges, Examineur

F. NOUREDDINE, Maître de Conférences à l'ENI de Tarbes, Co-Directeur de thèse, Taux d'encadrement : 50%

F. ROTELLA, Professeur à l'ENI de Tarbes, Directeur de thèse

Poste actuel : Maître de Conférences (section 61) Actuellement à l'IUT d'Anglet – 64 000

– M. S. MEDAR

Supervision et reconfiguration de la commande des systèmes dynamiques en présence de variations dans les conditions de fonctionnement

Doctorat de l'Inst. Nat. Polytechnique de Toulouse. Soutenue le 10 octobre 2002 à l'ENI de Tarbes devant le jury composé de :

Jean Philippe CASSAR, Professeur à l'IAA de Lille, Rapporteur

Hassan NOURA, Maître de Conférences, HDR à l'UHP de Nancy 1, Rapporteur

Joseph AGUILAR-MARTIN, Directeur de Recherche au LAAS-Toulouse, Examineur

Jean-Claude HAPIOT, Professeur à l'ENSEEIH-Toulouse, Examineur

Philippe CHARBONNAUD, Maître de Conférences à l'ENIT, Co-Directeur de thèse

Farid NOUREDDINE, Maître de Conférences à l'ENIT, Co-Directeur de thèse, Taux d'encadrement : 25 %

Frédéric ROTELLA, Professeur à l'ENIT, Directeur de thèse

Poste actuel : Ingénieur en R&D à Montréal – Canada.

– M. M. S. LAZEREGUE

Mécanismes de détection et de localisation de fautes pour un robot

Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Autorisation de soutenance délivrée par Messieurs les Rapporteurs le 16 Mai 1995. Soutenance annulée du fait de l'absence du candidat à la soutenance prévue le 03/07/95. Sous statut militaire, M. LAZEREGUE a dû rentrer à Alger à une époque où l'Algérie était en état de siège. Il n'a pu bénéficier des autorisations nécessaires pour revenir en France. Le jury était composé de :

Florent CHAVAND, Professeur au CNAM-Evry, Rapporteur

Marcel STAROSWIECKI, Professeur à l'UST de Lille, Rapporteur

Daniel NOYES, Professeur à l'ENI de Tarbes, Directeur de thèse

Maurice BRIOT, Professeur à l'UPS de Toulouse, Examineur

Guy JUANOLE, Professeur à l'UPS de Toulouse, Examineur

Farid NOUREDDINE, Maître de Conférences à l'ENI de Tarbes, Co-Directeur de thèse, taux d'encadrement : 80%

Abdelkader SAHRAOUI, Professeur à l'Université de Toulouse 2, Examineur Taux d'encadrement : 80%.

Poste actuel : Cadre militaire en Algérie.

### 5.2.3 Thèse de magister soutenue - 1

– R. NOUREDDINE

Contribution à l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes de production. Surveillance par analyse vibratoire d'un robot manipulateur

Thèse de Magister de l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique d'Oran-Algérie. Soutenue le 30 avril 2002 devant le jury constitué de :

Abdelkader BELAIDI, Professeur à l'ENSET Oran, Président  
Idir BELAIDI, Maître de Conférences à l'Université de Boumerdes, Examinateur  
Abdelmadjid CHEIKH, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, Examinateur  
Ali BENAMAR, Maître de Conférences à l'ENSET Oran, Rapporteur  
Farid NOUREDDINE, Maître de Conférences à l'ENI Tarbes, Co-Encadreur  
Taux d'encadrement : 80%

#### 5.2.4 Master recherche et D. E. A. - 10

- B. VARAIN, Contrôle et surveillance d'un robot manipulateur, Institut National Polytechnique de Toulouse - Systèmes Automatiques, Toulouse 2004
- MOYENGA, Observateur adaptatif pour la détection, Institut National Polytechnique de Toulouse - Systèmes Automatiques, Toulouse 2004
- G. POIRIER, Détection et localisation de fautes - Application robotique, Institut National Polytechnique de Toulouse - Systèmes Automatiques, Toulouse 2003
- S. BORJA, Détection et localisation de fautes pour les systèmes non stationnaires - Application robotique, Institut National Polytechnique de Toulouse - Systèmes Automatiques, Toulouse 2003
- C. GERBET, Système de décision pour la détection de fautes en robotique Institut National Polytechnique de Toulouse - Systèmes Automatiques, Toulouse 2001
- M. P. ALBERTUS, Détection et localisation de fautes en robotique Institut National Polytechnique de Toulouse - Systèmes Automatiques, Toulouse 2000
- M. G. MOYNARD Les systèmes multi agents pour la conception de systèmes sûrs de fonctionnement, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse 1999
- M. M. F. ESCALANTE, Modélisation et identification paramétrique pour le diagnostic d'un système à entraînement électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse - ENSEEIHT, Toulouse 1997
- M. A. DAMA, Détection de fautes sur une pince de robot, Institut National Polytechnique de Toulouse - ENSEEIHT, Toulouse 1996
- M. R. MHRILAF, Architecture de contrôleurs de robot tolérante aux fautes,

Université Paul Sabatier, Toulouse, 1992

## 5.3 Rayonnement scientifique et transfert industriel

### 5.3.1 Participation aux jurys de thèses - 1

- M. F. KHATTAR  
Titre : Enrichir les laboratoires distants grâce à la vision par ordinateur avec drone  
Thèse de Doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, soutenue le 13 décembre 2018 à l'IUT Bayonne - Anglet, Cotutelle internationale Université du Pays Basque devant le jury composé de :  
M. P.Y. COULON, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble  
M. F. DORNAIKA, Directeur de Recherche, Université du Pays Basque  
M. B. LARROQUE, Maître de Conférences, Université de Pau et des Pays de l'Adour  
Mme S. LE HEGARAT-MASCLE, Professeur des Universités, Ecole Nationale Supérieure de Cachan  
M. F. LUTHON, Professeur des Universités, Université de Pau et des Pays de l'Adour  
M. F. NOUREDDINE, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes  
M. Y. RUICHEK, Professeur des Universités, Université de Technologie de Belfort Montbéliard

### 5.3.2 Participation aux comités scientifiques et comités de lecture

- Expertise de l'article N° EE18279 de : Journal of Engineering Science Technology, Décembre 2018, <http://jestec.taylors.edu.my>
- Membre du TPC (Technical Program Comitee) de la conférence : The International Conference on Network Engineering and Information Security (NEIS2018), April 20th - 22nd, 2018, Wuhan, China
- Membre du comité scientifique d'une journée d'étude sur la maintenance industrielle, JOSIM07, 12 mars 2007 à Oran-Algérie
- Membre du comité de lecture de IECON05, International on Industrial Applications of Electronics IEEE, Raleigh – USA, 6 – 10 novembre 2005
- Membre du comité scientifique de Qualita 2005, Bordeaux – 16,17 et 18 mars 2005
- Membre du comité de lecture de ISIE 2004, International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, Ajaccio, 2004

- Membre du comité de lecture du Colloque International de Génie Mécanique, SIGMA'02, Oran 2002, Chairman de la session Productique

### 5.3.3 Cluster - Groupement et Club

- Représentant de l'Enit au cluster Robotics Place depuis Janvier 2018
- Expert Robotique, en charge de la création du pôle robotisation du Centre de R&D Métallicadour - 2013
- Membre du GDR Robotique
- Membre du Club EEA

### 5.3.4 Transfert industriel

#### – **Projet d'aide à l'innovation Anvar, 1992**

Sur une problématique définie par la société Robolix, rue Bourbon, 32320 Cologne, un programme d'étude concernant le contrôle dimensionnel de fabrication de tubes par vision a été mené à bien. Ce programme a reçu une aide à l'innovation ANVAR (n° A 91 07 091 M). En qualité de responsable scientifique, j'ai orienté la réalisation des travaux vers le développement d'une méthode basée sur le principe de la stéréovision. A l'issue de cette étude, l'ENIT a fourni à Robolix le logiciel correspondant à l'algorithme de traitement d'images. Les principaux résultats de cette étude ont fait l'objet d'une publication au 3ème Congrès Espagnol de Robotique à Saragosse, en novembre 1993 ainsi que la rédaction d'un rapport remis à Robolix.

#### – **Contrat ENIT-Conseil Régional Midi Pyrénées, 1992-1994**

« Contrôle dimensionnel de pièces mécaniques assisté par vision », D. Noyes, F. Noureddine, Contrat n°RECH/ 9200285, Conseil Régional Midi-Pyrénées, rapport final, décembre 1995. Suite à l'appel d'offre du Conseil Régional de Midi Pyrénées, représenté par le CCRRDT (Comité Consultatif Régional pour la Recherche et le Développement Technologique) un projet impliquant principalement une machine à mesurer tridimensionnelle et un système de vision avec 2 caméras a été mené à terme.



# Bibliographie

- BOUKEZZI, F., NOUREDDINE, R., BENAMAR, A. et NOUREDDINE, F. (2017a). Modelling, prediction and analysis of surface roughness in turning process with carbide tool when cutting steel c38 using artificial neural network. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 26:567–583.
- BOUKEZZI, F., NOUREDDINE, R. et NOUREDDINE, F. (2017b). Prédiction de la rugosité de surface par réseaux de neurones. *GIGI*, 26:567–583.
- CASTILLO, E., HADI, A., BALAKRISHNAN, N. et SARABIA, M. (2005). *Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and the Sciences*. Wiley, WILEY-INTERSCIENCE.
- DIAMOUTENE, A. (2018). *Contribution de la théorie des valeurs extrêmes à la gestion et à la santé des systèmes*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- DIAMOUTENE, A., KAMSU-FOGUEM, B., NOUREDDINE, F. et BARRO, D. (2018a). Prediction of U.S. general aviation fatalities from extreme value approach. *Transportation Research Part A*, 109:65–75.
- DIAMOUTENE, A., NOUREDDINE, F., KAMSU-FOGUEM, B. et BARRO, D. (2018b). Quality control in machining using order statistics. *Measurement*, 116.
- EMBRECHTS, P., KLUPPELBERG, C. et MIKOSCH, T. (1997). *Modelling extremal events*. Springer Verlag, Berlin.
- FISHER, R. et TIPPET, L. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24:180–190.
- FRÉCHET, M. (1927). Sur la loi de probabilité de l'écart maximum. *Annales de la Société Polonaise de Mathématiques*, 6:93–116.
- GNEDENKO, B. (1943). Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire. *Annals of Mathematics*, 44(3):423–453.
- LARROQUE, B. (2008). *Observateurs de systèmes linéaires - Application à la détection et localisation de fautes*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.



- LARROQUE, B., NOUREDDINE, F. et ROTELLA, F. (2010). Modélisation d'observateurs à entrées inconnues pour la détection de fautes actionneurs et la localisation de fautes de mesure. *JESA*, 44-2.
- NOUREDDINE, F. (1996). Conception d'un outil logiciel graphique pour l'analyse comportementale d'un robot en mode dégradé. *Revue Internationale de CFAO et d'informatic graphique*, 11.
- NOUREDDINE, F. (2004). Fault tolerance of robots manipulators. *AVCS'04, International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety, I3M, IFAC, Genova, Italy*.
- NOUREDDINE, F. (2005). Accommodation de trajectoires d'un robot suite au blocage d'une articulation. *Qualita 2005, 6ème Congrès International Pluridisciplinaire. Qualité et Sécurité de Fonctionnement*.
- NOUREDDINE, F., LARROQUE, B. et ROTELLA, F. (2009). Fault tolerance in robotics. *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2:294–310.
- NOUREDDINE, R. (2008). *Implémentation de la maintenance prédictive dans les systèmes de production*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie, Oran-ALGERIE.
- NOUREDDINE, R., BENAMAR, A. et NOUREDDINE, F. (2008). Maintenance prédictive de l'outil de coupe en usinage. *Mécanique et Industries*, 9-3:205–213.
- NOUREDDINE, R., NOUREDDINE, F. et BENAMAR, A. (2012a). Fault tolerant gripper in robotics. *7th Europe-Asia Congress on Research and Education in Mechatronics, IEEE, PREM-MECATRONICS*.
- NOUREDDINE, R., NOUREDDINE, F. et BENAMAR, A. (2012b). Surface roughness measurement for model-based fault detection in turning process. *International Review of Mechanical Engineering*, 6:1411–1417.
- RESNICK, S. (1987). *Extreme Values, Regular variation and Point Processes*. Springer Verlag, New-York.